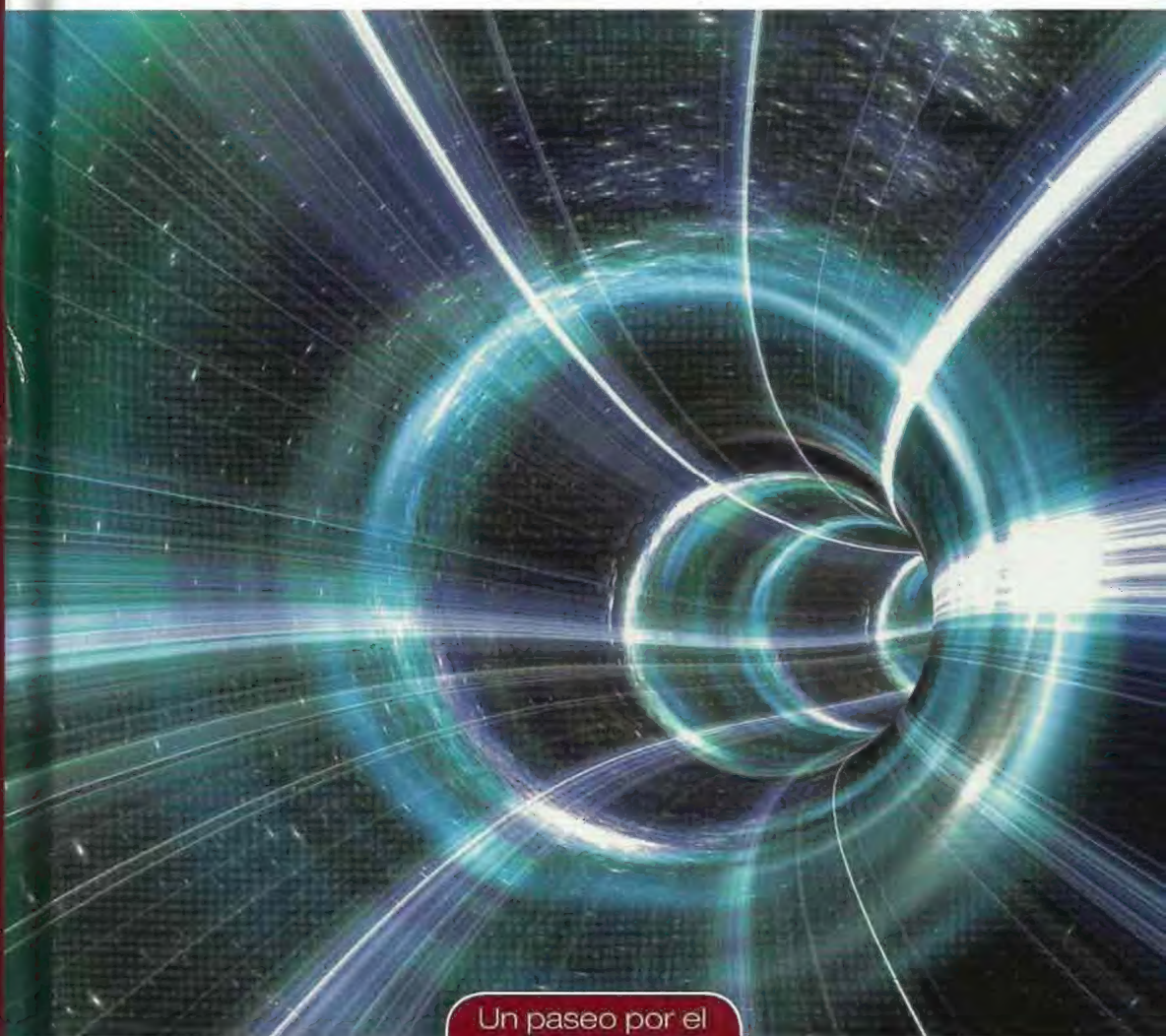


La posibilidad de viajar en el tiempo

Senderos cósmicos al futuro
y al pasado



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoueau.blogspot.com/>

La posibilidad de viajar en el tiempo

Senderos cósmicos al futuro
y al pasado

RBA

Imagen de cubierta: Representación artística de un agujero de gusano, un atajo espaciotemporal a través del cual serían posibles los viajes en el tiempo.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© José Enrique Amaro Soriano por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDFTEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: NASA: 81a; NASA/Chandra X-ray Observatory: 81b;
Casey Reed/Penn State University: 104; Lucas Taylor/CERN: 51;
Thinkstock: portada.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8385-6
Depósito legal: D-2351-2016

Impreso y encuadernado en Rodean, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	La relatividad del tiempo 13
CAPÍTULO 2	El viaje al futuro 39
CAPÍTULO 3	El viaje al pasado 59
CAPÍTULO 4	Máquinas del tiempo 93
CAPÍTULO 5	Las puertas del tiempo 117
LECTURAS RECOMENDADAS	151
ÍNDICE	153

La reacción de la mayoría de la gente ante la idea de los viajes en el tiempo es, al principio, de escepticismo. Generalmente se asocia a una fantasía imposible propia de la ciencia ficción, y nunca a una posibilidad realizable desde el punto de vista científico. A pesar de su incredulidad, muchos opinan que el tema de viajar en el tiempo es ciertamente irresistible por sus fantásticas posibilidades. Desde sus inicios, la literatura de ciencia ficción y luego el cómic, el cine y la televisión, respondieron ampliamente a la demanda de historias imaginarias sobre viajes en el tiempo y paradojas imposibles. Las revistas *pulp* que se publicaron en Estados Unidos a principios del siglo xx, como *Thrilling Wonder Stories* y *Amazing Stories*, fueron especialmente prolíficas en relatos que desafiaban la inteligencia del lector con argumentos que, paulatinamente, se hicieron más sofisticados, llegando a vislumbrar los problemas científicos que supone un viaje a otras épocas pasadas o futuras.

Aunque los autores se toman frecuentemente licencias literarias sin fundamento científico, en la ciencia ficción los hechos se describen con la suficiente precisión científica para que el argumento parezca plausible y, al mismo tiempo, interesante. Gracias

a las especulaciones lanzadas mediante la ciencia ficción se han llegado a hacer predicciones, más o menos aproximadas, sobre los viajes espaciales, los ordenadores, los robots, las comunicaciones y tantos otros avances de la ciencia y de la tecnología que son hoy una realidad. Pero la máquina del tiempo se aleja tan radicalmente de los hechos que se consideran ciertos desde la ciencia empírica, parece algo tan fantástico y presenta tantas paradojas increíbles y absurdas, que ni la mayor parte de los más imaginativos estudiantes de ciencias lo considerarían una proposición practicable. También es lo que piensan muchos físicos, aunque no todos. Hasta fechas muy recientes, incluso los escritores de ciencia ficción estaban convencidos de la imposibilidad de viajar en el tiempo. El maestro de la ciencia ficción Lester del Rey escribió en 1979 que «el viaje en el tiempo es una de las convenciones del género que parece claramente imposible» y el famoso escritor Orson Scott Card manifestó en 1990 que las máquinas del tiempo no eran más que un truco de magia para los escritores de ficción.

Una de las barreras que impiden pensar que este tema puede llegar a ser razonable (aparte del problema de alcanzar una tecnología capaz de realizarlo) son las paradojas lógicas del viaje al pasado, que surgen al contemplar la posibilidad de modificar hechos pretéritos que cambiarían toda la historia subsiguiente de la vida. Esto lleva a situaciones absurdas, como la «paradoja del abuelo». Si viajas hacia atrás en el tiempo y matas a tu abuelo, no llegarás a nacer y, por tanto, no habrás existido. Por consiguiente, nunca pudiste ir al pasado y matar a tu abuelo. Este simple razonamiento, lógico por la reducción al absurdo que se utiliza para demostrar teoremas matemáticos, nos llevaría a la conclusión de que una de las dos premisas no es cierta. O bien no es posible viajar al pasado, o bien no es posible matar a nuestro abuelo. Este ejemplo deja claro que, si el viaje en el tiempo fuese físicamente posible, debería estar sometido a ciertas reglas, o leyes, como cualquier fenómeno natural. Muchas de estas leyes de la ciencia del viaje en el tiempo han sido descubiertas y propuestas recientemente por los físicos. Por ejemplo, la paradoja del abuelo se evita invocando la ley de la no interferencia, que

viene a decir que no es posible interferir en el pasado para modificar el presente. Si intentas matar a tu abuelo, ocurrirá algo que te lo impedirá.

A falta de un fundamento empírico mínimamente científico, en la literatura se idearon los métodos más inverosímiles para justificar el viaje temporal. Así, en *Un yanqui en la corte del rey Arturo* (1889), Mark Twain hizo viajar a su protagonista al pasado mediante un fuerte golpe en la cabeza, mientras que el mago Merlín tuvo que utilizar sus conocimientos mágicos para invertir el proceso. *La máquina del tiempo* (1895) de H.G. Wells, se fundamentaba en la hipótesis de que el tiempo era la cuarta dimensión y que debía ser posible moverse en dicha dirección del mismo modo que podemos desplazarnos por las dimensiones espaciales. Sin embargo, en la novela nunca se reveló el mecanismo físico por el cual su máquina podía desplazarse a lo largo del tiempo manteniéndose en un punto fijo del espacio. Para Wells, la base científica del viaje en el tiempo no era la relatividad y la curvatura del espacio-tiempo que Einstein propondría pocos años después. Existen innumerables medios imaginados en la ciencia ficción y la fantasía para viajar en el tiempo, entre ellos la inducción neuronal (el nombre técnico que describe el viaje mental a un cerebro del pasado curvando el tiempo), los poderes mentales, el sueño o hibernación o la inducción por drogas e hipnosis.

Esta gran fascinación que despierta el viaje en el tiempo nos conduce una y otra vez a la gran pregunta: ¿podría ser realmente posible? Los más incrédulos responderían rotundamente: no. Desde el punto de vista científico, la respuesta será afirmativa si la pregunta se refiere al viaje al futuro. La teoría especial de la relatividad de Einstein ofrece las claves para ello. El caso del viaje al pasado es mucho más problemático. Pero no se puede afirmar categóricamente que es imposible. Sea cual sea la respuesta, una de las claves podría estar en la teoría de la relatividad general de Einstein, ya que la curvatura del espacio-tiempo posibilita cierto tipo de máquinas del tiempo.

Podemos decir que la oportunidad de viajar en el tiempo comenzó a contemplarse seriamente con el nacimiento de la teoría

de la relatividad especial en 1905, según la cual el transcurrir del tiempo no es inmutable ni absoluto, sino que depende del movimiento y, por tanto, puede ser manipulado en cierto modo. Cuando, ese año, el joven de veintiséis años Albert Einstein (1879-1955) publicó su célebre artículo, titulado *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, en una prestigiosa revista de física alemana, los físicos no tenían medios para comprobar que dos relojes inicialmente sincronizados que recorrieran trayectorias separadas a grandes velocidades (próximas a la velocidad de la luz) y vueltos a reunir más tarde, dejarían de estar sincronizados. Y sin embargo, esto es precisamente lo que se desprendía de la teoría de la relatividad especial.

La teoría de la relatividad nos ha revelado que el viaje en el tiempo está estrechamente conectado con la luz y con el espacio. El límite insuperable que establece la velocidad de la luz es la clave para viajar tanto al futuro como al pasado. Para la luz no transcurre el tiempo; no existe el pasado ni el futuro. En este libro veremos que la receta para viajar en el tiempo es simple. Para viajar al futuro hay que *perseguir* a un rayo de luz. En cambio, para viajar al pasado hay que *adelantar* a un rayo de luz. Una hipotética máquina del tiempo debería poner a nuestra disposición los medios para hacer esto. Perseguir un rayo de luz es la parte más fácil, aunque requiere medios que no están a nuestro alcance. Adelantar a un rayo de luz es mucho más complicado y aún no se sabe si es posible.

Para entender por qué adelantar a un rayo de luz implica viajar al pasado, imaginemos que estamos en el futuro. En la Tierra se sigue con gran interés la liga interplanetaria de fútbol de un planeta de Alfa Centauri, situado a cuatro años-luz de nuestro planeta, y se realizan apuestas sobre los resultados de los partidos. A la velocidad de la luz, las noticias de Alfa Centauri tardan cuatro años en llegar hasta nosotros. Esto quiere decir que las apuestas que se realizan cada semana en nuestro mundo corresponden a partidos que se disputaron hace cuatro años. Si alguien desde Alfa Centauri envía una señal a la Tierra con los resultados de la quiniela a una velocidad superior a la luz, estos resultados nos llegarán antes de que los partidos se disputen. Por tanto, estará

comunicando con el pasado. El cómplice en la Tierra podrá apostar sobre seguro para hacerse millonario.

La teoría de la relatividad prohíbe viajar a la velocidad de la luz, pero en rigor no excluye superarla. En la década de 1960 el físico Gerald Feinberg popularizó la teoría de los taquiones, unas partículas hipotéticas más rápidas que la luz. La idea, interesante, fue explorada en profundidad por los físicos teóricos, lo que permitió entender la conexión existente entre la comunicación a velocidad superlumínica y las paradojas asociadas con el viaje hacia atrás en el tiempo. Hoy hay serias dudas sobre la existencia de taquiones. Y en caso de que existieran, no sería posible detectarlos. Su acoplamiento a la materia implicaría que la materia normal sería inestable, ya que los protones y otras partículas se desintegrarían emitiendo taquiones.

En este libro, adelantar a un rayo de luz no significará superar la velocidad de la luz, sino tomar un atajo por el espacio-tiempo curvo o por el hiperespacio. El efecto gravitatorio de grandes concentraciones de materia y energía, como estrellas de neutrones, agujeros negros o cuerdas cósmicas, distorsiona y curva el espacio-tiempo en sus cercanías. Ciertas configuraciones de materia podrían producir *curvas temporales cerradas*, senderos en el espacio que conducen al pasado.

Tampoco hablaremos aquí del otro tipo de viaje al pasado que supondría la inversión temporal. Invirtiendo la flecha del tiempo, en lugar de envejecer nos haríamos más jóvenes y todos los sucesos que han ocurrido se repetirían en orden temporal inverso, como al proyectar una película hacia atrás. Este proceso está prohibido por la segunda ley de la termodinámica y no es posible revertir el envejecimiento de las cosas. La flecha del tiempo es inalterable, ya que tiene su origen en la evolución del universo a partir de las condiciones existentes antes de la gran explosión con la que comenzó nuestro mundo. Al viajar en nuestra máquina del tiempo, el crononauta (eventual viajero del tiempo) siente el paso del tiempo hacia delante y envejece normalmente. Si las leyes de la física permiten visitar épocas pasadas, no es debido a la inversión de la flecha del tiempo, sino a que la teoría de la relatividad nos permite doblarla.

El tema se las trae, estimados crononautas. Pero no se desanimen. En este libro intentaremos brindarles algunas ideas para sortear, al menos en teoría, la que, hoy por hoy al menos, es la imparable trayectoria del tiempo.

La relatividad del tiempo

Entender esos viajes al futuro o al pasado conlleva cierta familiarización con los conceptos relativistas del espacio y del tiempo, de los que se desprende la denominada dilatación del tiempo: un efecto muy raro, e imperceptible a no ser que viajemos a una velocidad cercana a la de la luz. Un efecto que, todo apunta, nos puede brindar la posibilidad de viajar hacia el futuro.

La naturaleza del tiempo ha sido siempre un misterio. Los filósofos griegos incluso cuestionaron su existencia, como si se tratara de una ilusión. Como Zenón de Elea (ca. 490-ca. 425 a.C.), que concibió diversas paradojas que reflejaban su misterio. Zenón imaginó una flecha en movimiento, en el instante preciso en el que pasaba junto a otra flecha inmóvil colgada de un árbol. Si congeláramos el tiempo en ese preciso instante, veríamos a las dos flechas inmóviles exactamente iguales. Pero al pasar al instante posterior en el tiempo surgía la paradoja. ¿Cómo sabe la flecha en movimiento que debe cambiar de posición, si en el instante anterior era exactamente igual a la otra que está en reposo? Desde el moderno punto de vista de la física, las dos flechas no son iguales, porque la flecha en movimiento posee inercia o energía cinética. La paradoja de Zenón nos indica que el tiempo está asociado al movimiento y al cambio de posición de la flecha.

Aristóteles (384-322 a.C.) argumentó que el tiempo era movimiento, ya que se medía mediante el desplazamiento del Sol en el cielo o de la arena dentro de un reloj. La existencia del pasado y del futuro era necesaria para el movimiento. Si solo existiera el presente, el movimiento no podría tener lugar. Si todo el movi-

miento cesara, incluido el de los átomos, el tiempo se detendría. Algunos siglos más tarde, san Agustín (354-430), el gran pensador de la cristiandad, reflexionó sobre la naturaleza del tiempo en su obra *Confesiones*. Para Agustín de Hipona, el tiempo no existía como entidad propia, sino como una tendencia que cambia

¿Qué es, pues, el tiempo?

Si nadie me lo pregunta, lo sé;
pero si quiero explicárselo al
que me lo pregunta, no lo sé.

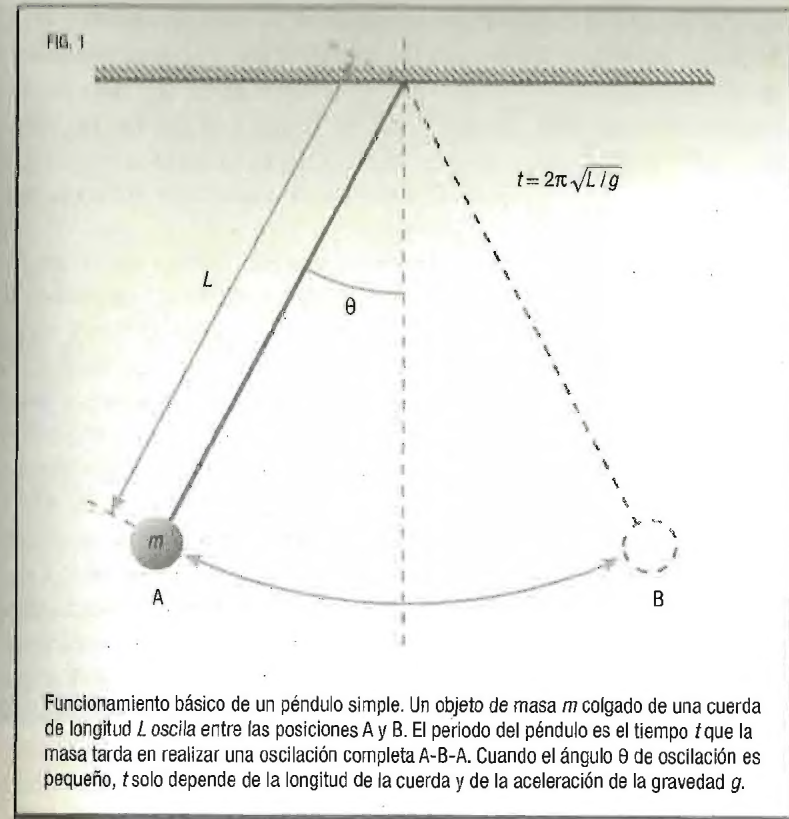
SAN AGUSTÍN EN
CONFESIONES, LIBRO DECIMOPRIMERO

«¿qué es el tiempo?» desde el punto de vista de la ciencia. Esto no impide que podamos utilizar el tiempo, t , como un parámetro conveniente para describir el movimiento de un automóvil.

Galileo Galilei (1564-1642) se dio cuenta de que el movimiento de los cuerpos podía ser descrito mediante fórmulas matemáticas que expresaban la evolución temporal de cantidades observables (medibles con un instrumento). Para dar sentido a estas leyes, era crucial encontrar una forma objetiva para medir la variable tiempo. Galileo descubrió que era posible hacerlo contando el número de oscilaciones de un péndulo. Se cuenta que llegó a esta conclusión ya en su juventud, observando las pequeñas oscilaciones de la gran lámpara que colgaba del techo de la catedral de Pisa. Cuando las comparó con las pulsaciones de su corazón, comprobó que el número de latidos durante cada oscilación era siempre el mismo. Fue una observación clave, puesto que es la base del reloj moderno, porque el periodo de un péndulo depende de la longitud de la cuerda y de la gravedad (figura 1). Pocos años después, el físico neerlandés Christiaan Huygens (1629-1695) construyó el primer reloj de péndulo. Hoy todos los relojes contienen algún tipo de péndulo u oscilador y la medida del tiempo se basa en el número de oscilaciones. Las mediciones precisas del tiempo permitieron a Galileo descubrir las primeras leyes cuantitativas de la física en sus históricos experimentos con planos inclinados.

el presente en pasado, y el futuro en presente.

La concepción actual del tiempo no dista mucho de la de Aristóteles y san Agustín. Aunque la física describe el tiempo como parte del continuo espacio-tiempo y sabemos cómo se comporta, e incluso manipularlo, no es posible responder a la pregunta



No deja de haber algo enigmático en el método objetivo de Galileo para medir el tiempo. Ciertamente, midió el periodo del péndulo con su pulso, lo que llevó a la invención del reloj y poco después los médicos usarían a su vez un reloj, es decir un péndulo, para medir el pulso del corazón de sus pacientes. ¿Cómo podrían Galileo y los médicos estar seguros de que estaban realmente midiendo el tiempo? Después de todo, para comprobar que la oscilación de un péndulo dura un tiempo t , y que ese tiempo es constante, debemos medir la variable t usando otro péndulo.

Fue el célebre físico británico Isaac Newton (1643-1727) quien aclaró ese problema conceptual. Primero supuso que existe una cantidad a la que llamamos «tiempo», t . Un tiempo newtoniano

SI VAN A VIAJAR EN EL TIEMPO... ¡OJO CON EL CALENDARIO!

Un hipotético viajero del tiempo debe ser cuidadoso a la hora de calcular la fecha exacta de su punto de destino, ya que la medida del tiempo basada en el calendario ha cambiado a lo largo de los siglos. Imaginemos que queremos viajar a una fecha concreta de la antigüedad. Si no tenemos en cuenta estos cambios, podríamos equivocarnos en días o incluso semanas.

Por qué contamos el tiempo de determinada manera

Hace ya mucho tiempo decidimos contabilizar el tiempo en base a determinadas divisiones que conocemos como años, meses, semanas, días, horas, minutos y segundos. El año, el mes y el día son las unidades astronómicas de tiempo. El año, del latín *annus*, que significa «año» o «círculo», define el tiempo que tarda la Tierra en completar una órbita alrededor del Sol. Un mes (del latín *mensis* y el griego *mene*, que significa «Luna») es el tiempo de un ciclo lunar (luna llena, menguante, nueva y creciente) y un día (del latín *die*, período que dura un día) es el tiempo de un giro de la Tierra sobre su eje. La división del tiempo en semanas (de *septimana* y *septem*, «siete» en latín) proviene de la astrología. Los siete días de la semana corresponden a los cinco planetas de la Antigüedad: Marte, Mercurio, Júpiter, Venus y Saturno, y a los otros dos cuerpos astrales, el Sol y la Luna. El día fue partido en 24 fracciones o horas debido a que los egipcios dividían el día y la noche en 12 partes iguales. El número 12 era práctico por ser divisible por 2, 3 y 4. La longitud de una hora egipcia cambiaba con la época del año y la hora nocturna era distinta de la diurna. Las horas de igual longitud comenzaron a emplearse en la Edad Media, con la introducción del reloj mecánico. A su vez, la hora fue dividida en 60 minutos, una iniciativa que se remonta a los babilonios, los cuales empleaban un sistema numérico heredado de los sumerios, basado en el número 60. El segundo tiene un origen moderno y corresponde a una «segunda» división del minuto, similar a la de la hora.

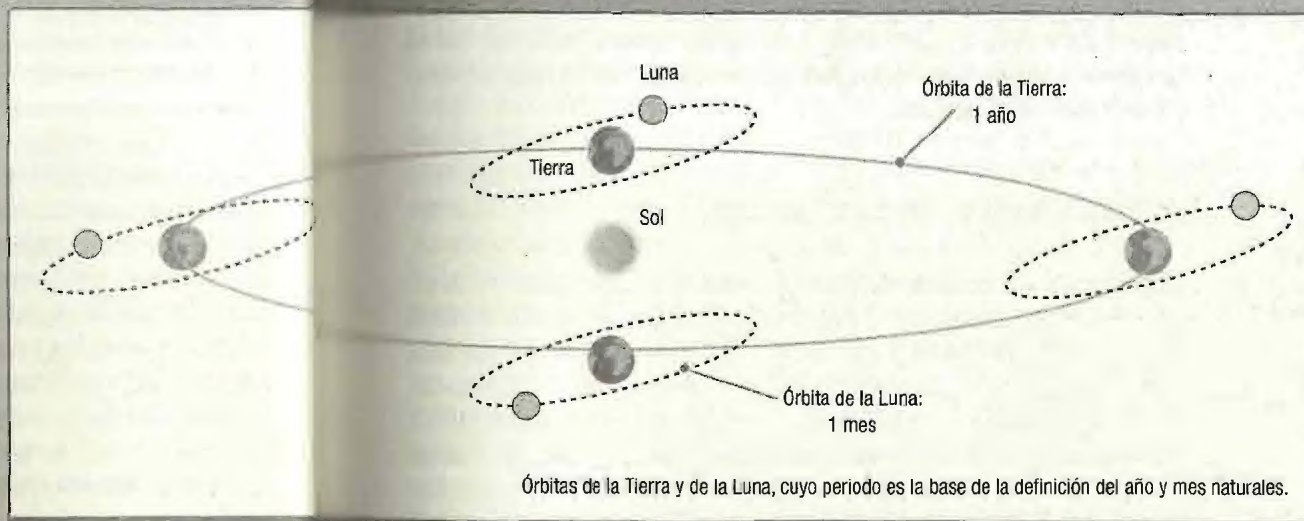
Compensando las imprecisiones

Las medidas del año, mes y día no son totalmente precisas en el calendario; ya que un ciclo lunar es de 29,53 días, con lo que un año tendría 12,37 meses. El año solar tampoco tiene un número exacto de días, sino que en realidad dura algo menos de 365,25 días. El primer calendario romano tenía 10 meses, con un total de 304 días. El primer mes era marzo. Septiembre, octubre, noviembre y diciembre eran el séptimo, octavo, noveno y décimo mes. Más tarde se añadieron los dos meses de enero y febrero, y el año vino a tener 355 días. Para compensar los diez días que faltaban para completar un año natural, cada cierto tiempo se añadía un mes o unos días de más. Esto provocó numerosos problemas hasta que Julio César adoptó

el calendario egipcio estableciendo el año en 365 días y un año bisiesto cada cuatro años. También cambió la duración de los meses y estableció al inicio del año el día 1 de enero en lugar del 1 de marzo.

Sincronizar con la exactitud

Un embargo, el año de 365,25 días es unos 11 minutos más largo que el año natural. Estos minutos se sumaban cada año. Con el transcurso de los siglos, el inicio de las estaciones cada vez se alejaba más de su fecha esperada en el calendario, lo que confundía a los agricultores. Esto llegó a ser un problema para la Iglesia en la Edad Media, ya que las fiestas religiosas no basaban en el calendario. Por ejemplo, el domingo de resurrección debía ser el primer domingo después del plenilunio que sigue al equinoccio de primavera, el 21 de marzo. En el siglo XII, Roger Bacon argumentó en su enciclopedia *Opus Major* que, debido a la inexactitud del calendario, las fiestas religiosas se estaban celebrando en los días equivocados. Sugirió que, para sincronizar el calendario con la realidad, cada 125 años debía eliminarse un día. En 1582 el calendario ya se había desincronizado más de 10 días. El papa Gregorio XIII estableció entonces el calendario gregoriano. Eliminó 11 días del calendario y los años bisiestos de cambio de siglo, a no ser que fueran múltiplos de 400. Esto equivale a eliminar un día cada 120 años. Hoy, el calendario gregoriano se utiliza de forma oficial en prácticamente todo el mundo. Algunos países lo adoptaron ya entrado el siglo XX, como China, Albania, Turquía, Bulgaria, Rusia, Estonia, Rumanía o Yugoslavia. Grecia fue el país europeo que lo hizo en último lugar, en el año 1923.



que fluye «absoluto e igual a sí mismo», pero que no es directamente observable. Podemos escribir ecuaciones matemáticas en donde aparezca t , pero no podremos acceder directamente a su valor exacto. La única posibilidad es construir relojes que nos proporcionen lecturas $T_1(t)$, $T_2(t)$,..., que son aproximaciones a

t con cierta precisión. Lo que en realidad podemos medir es la evolución de otras variables en términos de uno u otro reloj $A(T_1)$, $B(T_2)$,... Por otro lado, también podemos comparar entre sí las lecturas de distintos relojes $T_1(T_2)$, $T_2(T_3)$,... La consistencia de

El tiempo es el modo en que la naturaleza evita que todo suceda simultáneamente.

**JOHN ARCHIBALD WHEELER, FÍSICO ESTADOUNIDENSE,
INVENTOR DEL TÉRMINO «AGUJERO NEGRO».**

la física clásica se apoyó en el hecho de que todas estas observaciones concordaban con los cálculos obtenidos en las ecuaciones matemáticas donde aparece t .

Para los físicos que siguieron a Newton, el tiempo era un valor absoluto que fluía constantemente, como un río. La física clásica, que se desarrolló hasta finales del siglo XIX, no encontró ninguna contradicción en esa interpretación newtoniana del tiempo, pues era capaz de describir muchos de los fenómenos físicos conocidos hasta entonces. Puesto que el tiempo transcurría eternamente inmutable y para todos por igual, la idea del viaje en el tiempo era inconcebible. La única posibilidad era el viaje al futuro, segundo tras segundo.

LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

El gran descubrimiento de Einstein sobre la naturaleza del tiempo surgió porque no todo cuadraba en la física clásica. Existía un problema profundo, asociado a la velocidad de la luz, que comenzó a hacerse patente tras el descubrimiento de las ondas electromagnéticas por el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) en 1888, alentado por su colega y compatriota Hermann von Helmholtz (1821-1894). Los experimentos de Hertz confirmaron la relación entre la luz y el electromagnetismo. La existencia de ondas electromagnéticas que se propagaban a la velocidad

de la luz ya había sido predicha en la teoría unificada del campo electromagnético del físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), que no vivió lo suficiente para ver su teoría corroborada.

Maxwell demostró matemáticamente que los campos electromagnéticos (un par de campos eléctricos y magnéticos) se propagan en el vacío en forma de ondas, similares a las olas que se forman en la superficie del agua o a las ondas de presión en el aire que dan lugar al sonido. Cuando Maxwell calculó la velocidad de estas ondas, encontró que era igual a 300 000 km/s, igual que la velocidad de la luz. Era poco probable que esto fuera una coincidencia. La conclusión obvia era que la luz estaba constituida por ondas electromagnéticas.

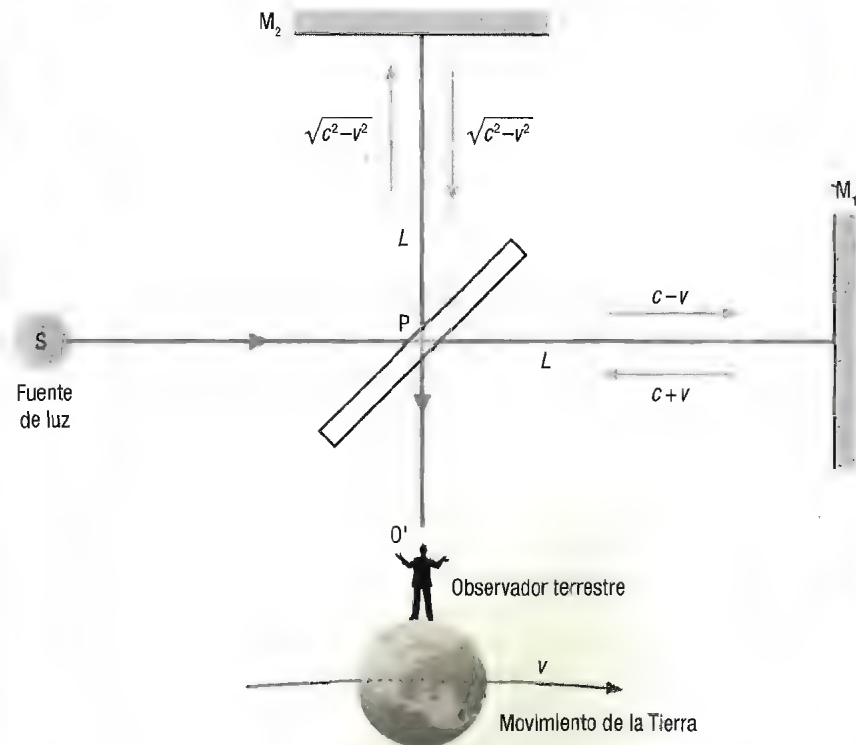
Pero surgió un problema porque, cuando hablamos de la velocidad de un objeto, es necesario especificar respecto a qué medimos esa velocidad. Cuando decimos que la velocidad del sonido es de 300 m/s, esta velocidad se refiere al aire. Una onda necesitaba un medio para propagarse, como el agua en el caso de las ondas en la superficie del agua, o el aire en el caso del sonido. No era concebible que la luz se propagara en el vacío sin un medio que la soportara. Por ello se pensó que debía existir una sustancia que llenaba todo el universo a través de la cual se propagaba la luz. Esta sustancia se denominó *éter*, un fluido invisible e indetectable con propiedades físicas concretas y extrañas, que debía incidir en la velocidad de las ondas, la cual depende de la rigidez del medio que las transmite. Por ejemplo, las ondas de sonido se mueven más rápido a través del acero que a través del aire o del agua. Se suponía que el éter tendría que ser muchísimo más rígido que el acero para que la luz viajase a 300 000 km/s. En cambio, todo indicaba que la Tierra y todo lo que había en el universo se movía a través del éter sin percibirlo.

Además de la cuestión del medio por el que se propagaba la luz, surgió otro dilema. Si la Tierra se mueve alrededor del Sol a 30 km/s, esa debía ser la velocidad que nuestro planeta alcanzaba con respecto al éter. Es decir: las ondas de luz se movían a través del éter a 300 000 km/s. Por tanto, para un observador en la Tierra, la velocidad aparente de la luz debería ser distinta dependiendo de la dirección en la que esta se propagara. Es

MICHELSON MORLEY: FULMINANDO LA TEORÍA DEL ÉTER

El experimento realizado en 1887 por Albert A. Michelson y Edward W. Morley en la Universidad Case Western Reserve de Cleveland, Estados Unidos, fue uno de los experimentos fundamentales en la historia de la física. Resultaba difícil de llevar a cabo debido a que los efectos esperados eran minúsculos, casi indetectables. Pero Michelson era un gran experto en la medición de la luz y se las apañó para medir esas mínimas diferencias. Para realizar el célebre experimento se utilizó un dispositivo denominado interferómetro. El esquema (figura 1) es el siguiente: una fuente S emite luz monocromática hacia la lámina semitransparente P, a una distancia L, que está orientada a 45° del rayo de luz. La lámina refleja el 50% de la luz incidente y transmite el

FIG. 1



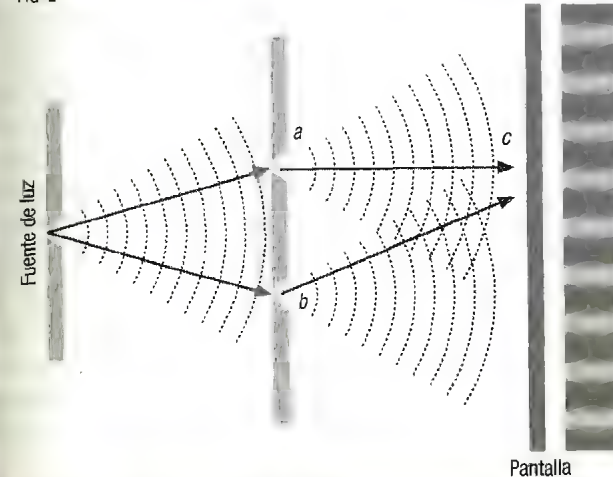
Esquema del experimento de Michelson y Morley. El rayo de luz sale de S y se divide en dos rayos en P, que se reflejan en M_1 y M_2 y son observados por O' .

50% (fig. 1), dividiendo el rayo incidente en dos rayos, perpendiculares que se dirigen hacia los espejos M_1 y M_2 . Los dos rayos se reflejan en M_1 y M_2 regresan a P y, eventualmente, llegan al observador O' . Se ha dibujado la trayectoria de la luz con respecto al sistema que se mueve con la Tierra.

Interferencias constructivas y destructivas

Al ser la velocidad de la Tierra, la velocidad del rayo de luz que va de P a M_1 es $c-v$. Cuando regresa, la velocidad del rayo desde M_1 a P es $c+v$. Los rayos que se mueven perpendicularmente a la Tierra desde P a M_2 y de M_2 a P tienen velocidad $\sqrt{c^2 - v^2}$. Por lo tanto, los rayos que se reflejan en M_1 y M_2 tardan distinto tiempo en llegar a O' . Esto implica una diferencia entre las dos ondas luminosas que se superponen en O' , lo que produce un patrón de interferencia similar al que se observa en la superficie del agua cuando dos ondas que llegan desde distintas direcciones se superponen. Si las dos ondas han recorrido la misma distancia y viajan el mismo tiempo, los máximos de las ondas coinciden en el mismo punto y la interferencia es constructiva, es decir, se suman sus alturas. La interferencia puede ser destructiva si existe una diferencia de tiempo o de distancia, ya que entonces el máximo de una onda puede coincidir con la depresión de la otra. En el caso de la luz, el patrón de interferencia observado consistiría en zonas claras y oscuras (figura 2). Sorprendentemente, en el experimento no se observa interferencia destructiva, lo que indica que la luz tarda el mismo tiempo en recorrer los dos caminos.

FIG. 2



Patrón de interferencia observado en un experimento de interferencia entre dos rayos de luz que, procedentes de una fuente luminosa, pasan a través de dos rendijas practicadas en a y b. Los dos rayos que inciden en c han recorrido distancias distintas y pueden interferir constructivamente o destructivamente, produciéndose el típico patrón de franjas claras y oscuras.

decir, debería verificarse la ley de adición de velocidades, una ley fundamental de la física clásica, asociada a la denominada transformación de Galileo entre sistemas inerciales que se mueven a una velocidad relativa constante.

Todos hemos experimentado el fenómeno de adición de las velocidades al viajar en automóvil o en tren. Si viajamos por la autopista a 100 km/h y nos adelanta otro coche que viaja a 120 km/h, la velocidad del otro coche en relación al nuestro será de 20 km/h. Si, por el carril contrario, avanza otro coche a 80 km/h, parecerá que se nos acerca a una velocidad relativa de 180 km/h. Es decir, las velocidades se restan cuando los dos vehículos avanzan en el mismo sentido y se suman si van en sentido contrario.

Por tanto, si la Tierra avanza por el éter en la misma dirección que las ondas de luz, deberíamos medir una velocidad relativa de la luz ligeramente inferior a 300 000 km/s y, en cambio, si la luz avanza en dirección opuesta, su velocidad relativa debería ser mayor. Sin embargo, no es así. En un memorable experimento realizado en 1887 por los físicos estadounidenses Albert A. Michelson y Edward W. Morley se evidenció, sorprendentemente, que la luz avanza a la misma velocidad en todas direcciones, como si la Tierra estuviera en reposo con respecto al éter.

Como suele ocurrir cuando se descubre un nuevo fenómeno que va en contra de los principios establecidos, los físicos inventaron una serie de explicaciones para este peculiar comportamiento de la luz. Quizá la Tierra arrastraba al éter con ella, como arrastra a la atmósfera, y cerca de la superficie terrestre el éter estaría en reposo relativo con respecto al planeta. Pero esta era una explicación poco probable, ya que el arrastre del éter se manifestaría en otros fenómenos de la luz, que no se han observado nunca. Finalmente, la existencia del éter fue descartada.

Pero si aún persistía alguna duda o dilema sobre el experimento de Michelson y Morley, Einstein se encargó de borrarlos de un plumazo cuando, en 1905, estableció su principio de relatividad especial:

Todas las leyes de la naturaleza son las mismas para todos los observadores en movimiento relativo de traslación uniforme.

Einstein supuso que la velocidad de la luz es una invariante física que tiene el mismo valor para todos los observadores, lo que se deducía aplicando el principio de relatividad a las leyes del electromagnetismo. Es decir, las ecuaciones de Maxwell implicaban que todos los observadores medirían la misma velocidad de la luz independientemente de su velocidad relativa.

Pero la consecuencia más sorprendente del principio de la relatividad es que el tiempo es relativo. Es decir, que si un observador que se mueve en el mismo sentido que un rayo de luz ve que esta avanza una distancia x en un tiempo t , entonces un observador que se mueva en el sentido opuesto verá que la luz ha avanzado una distancia x' mayor (puesto que se aleja de la luz). Pero eso implica que el segundo observador también debe medir un tiempo t' mayor, ya que al dividir la distancia entre el tiempo ambos deben obtener la misma velocidad de la luz.

TÚ TE MUEVES, YO ESTOY INMÓVIL

El principio de relatividad especial es el causante de la frecuente y curiosa ilusión del denominado «movimiento aparente», que es el que tiene lugar cuando, por ejemplo, viajamos en tren y nos detenemos en una estación. En ese momento vemos cómo entran y salen viajeros y advertimos que hay otro tren parado en la vía contigua. Al mirar por la ventana, fijamos nuestra vista en el interior del otro tren y observamos a sus pasajeros. De pronto tenemos la sensación de que nuestro vagón comienza a moverse lentamente *hacia atrás*. ¿Cómo es posible? Pasan unos instantes y nos damos cuenta de que el otro tren se ha marchado y nosotros seguimos en la estación. En realidad, era el otro ferrocarril el que se estaba moviendo hacia delante. Lo que sucede es que, mientras estábamos concentrados mirando su interior, este se había convertido, inconscientemente, en nuestro sistema de referencia.

Nuestro cerebro está habituado a un sistema de referencia fijo con respecto a nosotros. El físico y médico alemán Hermann von Helmholtz estudió estas cuestiones en el siglo XIX mientras estu-

diaba la fisiología de la visión. Los sofisticados mecanismos de la visión nos permiten calcular «a ojo» las distancias, tamaños y velocidades aproximadas de los objetos, pero siempre con respecto a un sistema de referencia fijo. Esto nos permite determinar una perspectiva en la que encuadrar nuestra percepción del espacio. Todo ello se realiza mentalmente de forma inconsciente, a no ser que algo no habitual llame nuestra atención. Entonces se requiere un acto de voluntad consciente que analice la nueva situación.

Al viajar en tren, estamos acostumbrados a salir de la estación lentamente mirando por la ventana y fijando mentalmente nuestro sistema de referencia en la estación inmóvil. La estación se mueve con respecto a nosotros, pero hemos aprendido a asociar dicho movimiento al movimiento de nuestro tren. En el caso del movimiento aparente, nuestros sentidos nos engañan: pensamos que nos movemos porque no es posible distinguir entre movimiento uniforme y reposo. De hecho, ambos son equivalentes, ya que, según el principio de relatividad, las leyes de la física son las mismas para dos observadores que se mueven entre sí con velocidad constante. Estos sistemas de referencia se llaman *sistemas inerciales*. No existe un sistema inercial en reposo absoluto, ya que sería imposible diferenciarlo físicamente de cualquier otro sistema inercial. Si existiera un sistema en reposo tendría que tener alguna propiedad especial que lo diferenciara, en contradicción con el principio de relatividad.

Hay que tener presente que la velocidad relativa entre sistemas inerciales debe ser constante, tanto en su magnitud como en su dirección y sentido. Si viajamos en el interior de un tren que se mueve a velocidad constante en un tramo rectilíneo, todos los fenómenos que ocurren en su interior son, respecto al sistema de referencia del tren, exactamente iguales que los que ocurren estando en reposo. Por ejemplo, si lanzamos una pelota hacia delante, esta sigue una trayectoria parabólica similar a la que seguiría en el sistema fijo con la Tierra. Pero el principio de relatividad se viola para un observador acelerado. Podemos diferenciar el estado de movimiento cuando el tren toma una

curva, por la fuerza centrífuga que empuja todos los objetos y a nosotros mismos hacia el exterior de la curva. Entonces el tren deja de comportarse como un sistema de referencia inercial, ya que su velocidad cambia de dirección y deja de ser constante. Cuando el tren acelera, notamos una fuerza que nos empuja hacia atrás. Si frena, sentimos esa fuerza pero empujándonos hacia delante.

Como el principio de relatividad se aplica solamente a los sistemas inerciales, la teoría resultante se conoce como *teoría de la relatividad especial o restringida*. Como veremos, Einstein generalizó su teoría años más tarde para tener en cuenta los sistemas de referencia no inerciales, en la teoría de la relatividad general.

Un sistema de referencia permite especificar unívocamente dónde y cuándo ocurre un suceso. Para ello, utilizamos tres coordenadas para la posición —el «dónde»— y una coordenada temporal, el «cuándo». Las coordenadas se pueden elegir de varias formas. Si nos queremos reunir con alguien, por ejemplo, especificaremos el nombre de la calle, el número del portal y de planta y la hora del encuentro. En total, son necesarias cuatro coordenadas, lo que indica que el ámbito de nuestro universo de sucesos, el espacio-tiempo, tiene cuatro dimensiones.

A menudo se utiliza un sistema de referencia cartesiano, imaginando tres ejes perpendiculares con respecto a los cuales cualquier punto del espacio, por proyección, posee tres coordenadas únicas (x, y, z) . El tiempo, t , correspondería a la coordenada en un cuarto eje que representa la cuarta dimensión. Las coordenadas de un suceso en el espacio-tiempo con respecto a un observador O serían los cuatro números (x, y, z, t) .

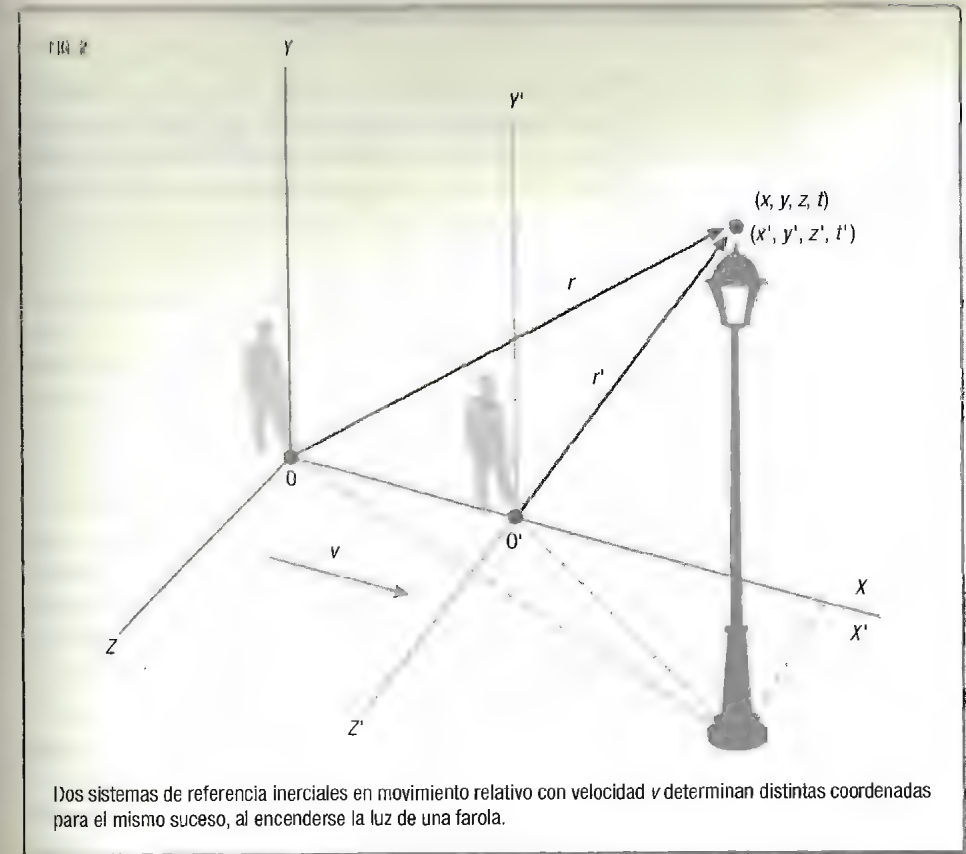
Imaginemos un sistema de referencia O' en movimiento relativo con el anterior (figura 2). Por ejemplo, O' viaja en un tren que se mueve a lo largo del eje x con velocidad v con respecto a O, que es un observador en el andén. Cuando O' observa el mismo suceso que el observador O, le asocia coordenadas distintas (x', y', z', t') . El suceso podría ser una farola que se enciende. Ahora es cuando un físico se pregunta ¿cuál es la relación entre las coordenadas que mide O y las que mide O'?

Sabemos que la vía del ferrocarril está orientada según el eje x . Por tanto, las dos coordenadas y , z , no se modifican cuando el tren se mueve. Lo que representan y y z es la altura de la farola y la distancia perpendicular entre ella y el convoy. Para un observador en el interior de un vagón la farola se mueve hacia atrás con la misma velocidad v . Supongamos ahora que ambos observadores se ponen de acuerdo al elegir el origen de su eje de coordenadas ($x=x'=0$) cuando el tren pasa por la primera farola de la estación y, en ese mismo instante, sincronizan sus relojes ($t=t'=0$).

Pongamos que transcurre un segundo ($t=1$ s) hasta que se enciende la segunda farola a una distancia de 20 m ($x=20$ m) respecto al observador O que se halla en el andén. En ese intervalo el tren ha avanzado una distancia que es igual a la velocidad por el tiempo. En caso de que su velocidad sea, por ejemplo, de 10 m/s, el tren habrá avanzado 10 m. El sentido común nos dice que, para el observador en el vagón, la segunda farola se ha movido hacia atrás una distancia igual a la que avanza su tren, es decir: debería hallarse a una distancia de 10 m ($x'=10$ m). El sentido común también nos dice que la luz de la farola se enciende en el mismo instante $t'=t$ también para el observador en el tren.

Todo este razonamiento es correcto si la velocidad del tren es muy inferior a la velocidad de la luz, como es nuestro caso. Esta relación entre las coordenadas respecto a O y respecto a O' se denomina *transformación de Galileo*. Pero dicha transformación falla cuando la velocidad del tren se acerca a la velocidad de la luz. En este caso se denomina *transformación de Lorentz*, postulada y publicada por el físico y matemático neerlandés Hendrik Antoon Lorentz en 1904. Tanto x' como t' se modifican para un observador en movimiento. El valor de x' depende de x y de t y será distinto del que se obtenía con la transformación de Galileo. Y no solo eso, el tiempo t' depende también de x y de t .

A grandes velocidades, las coordenadas que mide O' parecen alejarse completamente del sentido común. Supongamos que la velocidad del tren es el 90% de la velocidad de la luz, es decir, 270 000 km/s. Transcurrido un segundo en la estación, el tren



estará a 270 000 km de la estación. Como esto es imposible en la Tierra, imaginaremos que estamos en una estación espacial y pensaremos en una nave espacial en lugar de un tren. Como consecuencia de la transformación de Lorentz, el tiempo medido por el observador en el tren no es un segundo, sino 2,28 segundos y, para él, la farola (y por tanto la estación) se encuentra a una distancia de 615 000 km y no 270 000.

Esto es consecuencia de dos fenómenos relativistas conocidos como la *dilatación del tiempo* y la *contracción de la longitud*. Para entenderlos, debemos examinar detenidamente cómo se mide el tiempo y su relación con la velocidad de la luz.

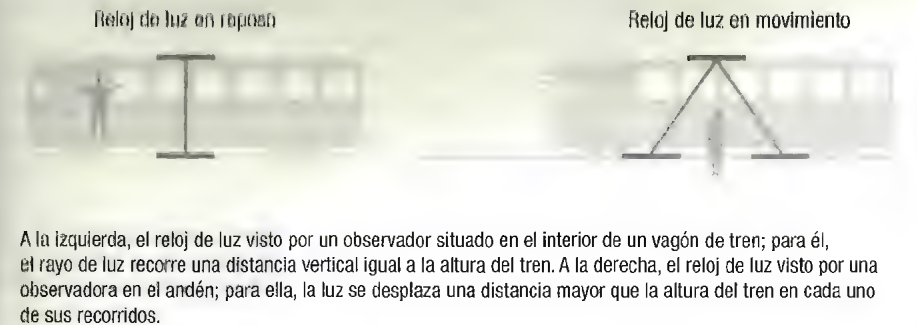
¿SE ATRASAN LOS RELOJES EN MOVIMIENTO?

Se dice que Einstein tuvo la idea de la dilatación del tiempo una soleada mañana de domingo, paseando por un elegante parque de la ciudad de Berna junto a su mujer, la matemática serbia Mileva Marić, y el hijo de ambos. Mientras Mileva atendía al bebé, Einstein se sentó en un banco dejando que los rayos del sol se filtraran a través de sus párpados entornados. Mientras disfrutaba de ese momento, se imaginó a sí mismo flotando junto a los rayos de luz. Recordó entonces un sueño de la adolescencia en el que se alejaba, volando a la velocidad de la luz, de un reloj situado en una torre en pleno mediodía. En esa imagen onírica el tiempo se detuvo porque, en el rayo de luz en el que Einstein viajaba, el reloj siempre marcaba las doce en punto.

La dilatación del tiempo significa que este transcurre más despacio para un observador en movimiento. Por tanto, si su velocidad se acercara a la de la luz, el tiempo casi llegaría a detenerse. Sin embargo, todo es relativo. Para el observador en movimiento, el sistema en reposo también viaja a una velocidad próxima a la luz. Por tanto, puede decir que el tiempo del sistema en reposo transcurre más despacio. En realidad, los dos observadores tienen razón. Todo depende del objeto de nuestras observaciones y, sobre todo, de quién las hace.

Recuperemos el ejemplo del tren que pasa por una estación a una gran velocidad, v . En el andén, sistema de referencia en reposo O , se encuentra una observadora que llamaremos Cecilia (figura 3, derecha). Dentro del tren, sistema de referencia en movimiento O' , viaja un observador que llamaremos Alberto (a la izquierda de la figura). En el interior del tren se ha instalado un curioso reloj consistente en un rayo de luz que oscila entre dos espejos perfectos enfrentados. Uno de los espejos está colocado en el suelo, y el otro, en el techo del vagón. El rayo de luz viaja alternadamente de abajo arriba y de arriba abajo con un periodo constante, como si fuera un péndulo. Este dispositivo funciona como un reloj. Cada vez que el rayo toca el espejo superior, el reloj hace «tic». Cuando el rayo toca el espejo inferior, el reloj hace «tac».

FIG. 3



Supongamos que la altura del tren, L , es de tres metros. Puesto que la luz viaja a 300 000 km/s, el rayo tarda exactamente 10 nanosegundos en llegar al techo y otros 10 en volver al suelo. Un nanosegundo (ns) es la duración de un ciclo de reloj en un procesador de un gigahercio (1 GHz) y equivale a la milmillonésima parte de un segundo. Desde la década de 1950 existen relojes que pueden medir intervalos de tiempo inferiores al nanosegundo. Los relojes atómicos registran el número de transiciones de los electrones entre dos niveles de energía de un átomo. Estas transiciones se producen en tiempos inferiores al ns. Asimismo, los sistemas de localización GPS requieren medir el tiempo con tal precisión que utilizan relojes atómicos para localizar la posición del receptor en la Tierra.

Según Alberto, el observador en reposo situado dentro del vagón, un ciclo de ese reloj instalado en el tren (subir y bajar) tarda 20 ns en completarse. Sin embargo, para Cecilia, que presencia la escena desde el andén, el tiempo es mayor de 20 ns. Esto es debido a que Cecilia observa el reloj en movimiento. Para ella, la luz está avanzando en zigzag (figura 3, derecha) y la luz debe recorrer una distancia mayor que la altura del tren. Como la velocidad de la luz es constante, para Cecilia tarda más tiempo que para Alberto en completar un ciclo. ¿Cuál es el tiempo que registra Cecilia?

Lo encontraremos con ayuda de un triángulo rectángulo (figura 4). La altura del triángulo es la distancia recorrida por la luz según Alberto. Para Cecilia, la base es la distancia recorrida por el tren, y la hipotenusa, la de la luz.

La explicación de este triángulo es la siguiente. Pongamos que, para Cecilia, la luz tarda un tiempo t en llegar al techo. Cuando el rayo de luz llega al techo, el tren se ha movido una distancia vt . Por tanto, para Cecilia la luz en realidad se mueve siguiendo la diagonal del triángulo. La distancia recorrida por la luz es ct . Para Alberto la luz tarda un tiempo t' en llegar al techo (10 nanosegundos). Entonces para Alberto la luz recorre una distancia ct' . Esta distancia es igual a la altura del tren.

Aplicando al triángulo el teorema de Pitágoras, llegamos a la siguiente ecuación:

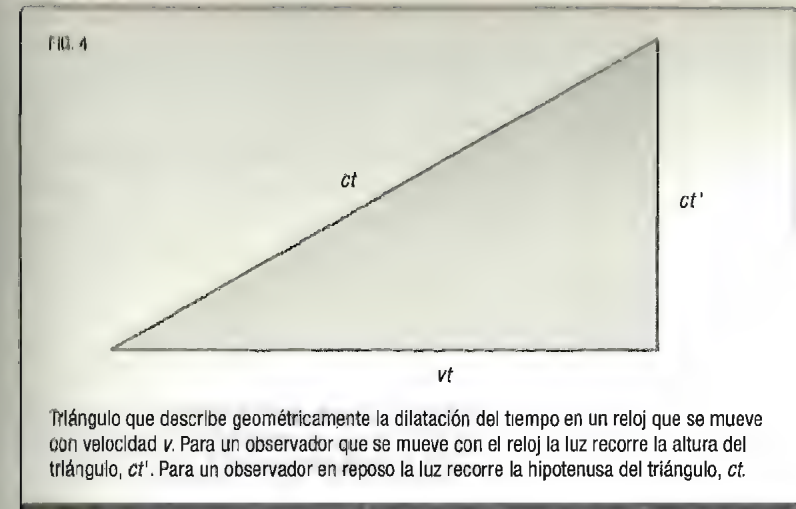
$$(ct)^2 - (vt)^2 = (ct')^2. \quad [1]$$

De aquí se puede despejar el tiempo t , resultando

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad [2]$$

Estas dos ecuaciones son las más importantes de la relatividad especial para el viaje en el tiempo. Conviene estudiarlas detenidamente.

La primera ecuación [1], que más adelante estudiaremos con mayor detalle, establece cómo se calculan las distancias entre sucesos y expresa la peculiar geometría del espacio-tiempo, resumida en el triángulo de la figura 4. La segunda ecuación [2] implica que el tiempo se dilata, porque el denominador en la ecuación [2] siempre es menor que uno. Por tanto, t es siempre mayor que t' . Dicho denominador aparece recurrentemente en la teoría de la relatividad y se denomina *factor de contracción de Lorentz*. Fue introducido independientemente por Lorentz y George FitzGe-



rald para intentar explicar los resultados del experimento de Michelson-Morley.

El factor de Lorentz vale 1 cuando $v=0$. O lo que es lo mismo: cuando el tren está en reposo ambos observadores miden el mismo tiempo. El factor de Lorentz vale cero cuando $v=c$, por lo que el tiempo t sería infinito. El factor de Lorentz es imaginario cuando v es mayor que c (la raíz cuadrada de un número negativo). Estas son algunas de las razones por las que se dice que solo la luz puede moverse a la velocidad de la luz y nada puede moverse más rápido que ella. La ecuación [2] solo tiene sentido cuando v es menor que c .

Si en nuestro ejemplo la velocidad del tren es el 90% de la velocidad de la luz, entonces el factor de Lorentz es 0,44. Esto quiere decir que cada segundo de Alberto corresponde a $1/0,44 = 2,28$ segundos de Cecilia. Como todo lo que viaja con Alberto está sincronizado con su reloj, todo lo que sucede en el interior del tren aparece ralentizado para Cecilia, como al proyectar una película en cámara lenta. Los latidos del corazón de Alberto, también sincronizados con su reloj, son más lentos. Alberto envejece más lentamente. Cuando transcurran 10 años para Alberto, a Cecilia le parecerán casi 23 años.

CUANDO LAS LONGITUDES SE CONTRAEN

Si Cecilia quisiera determinar la longitud de un tren que pasa por la estación con velocidad v , sin detenerse, podría hacerlo cronometrando el tiempo t que tarda todo el tren en pasar ante un punto fijo en el andén (parte superior de la figura 1). Para ello, Cecilia se colocará en el centro del andén y, con su *smartphone*, grabará en video la escena del tren que pasa ante ella. Luego visualizará las imágenes y apuntará los tiempos en los que el frente y la cola del tren aparecen en el centro de la pantalla. La diferencia entre estos dos tiempos será el tiempo que tardó el tren en pasar. El espacio recorrido por el tren en ese tiempo es igual a la longitud del tren. Como el tren se mueve con velocidad v , Cecilia deduce que la longitud del tren es

$$L = vt.$$

Alberto, que viaja en el tren, podría usar un procedimiento similar para calcular la longitud del tren. Desde su sistema de referencia (el tren), Cecilia se mueve con velocidad v . Entonces Alberto puede cronometrar el tiempo que tarda Cecilia en recorrer el tren (ver parte inferior de la figura). Esto podría hacerlo colocando una *webcam* en el frontal del primer vagón enfocada hacia el andén y otra cámara similar en el de la cola. Cuando visualice las dos películas será sencillo para Alberto determinar los instantes en que Cecilia aparece en las imágenes y restando estos dos tiempos obtendrá el tiempo t' transcurrido en el tren. Entonces deducirá que la longitud del tren y la distancia recorrida por Cecilia son

$$L' = vt'.$$

Para Alberto, el reloj de Cecilia está en movimiento. Por tanto verá que el reloj de Cecilia se atrasa con respecto al suyo, es decir

$$t = \sqrt{1 - v^2/c^2} \, t'.$$

Multiplicando los dos miembros de esta ecuación por la velocidad v , encontramos la relación entre las longitudes del tren

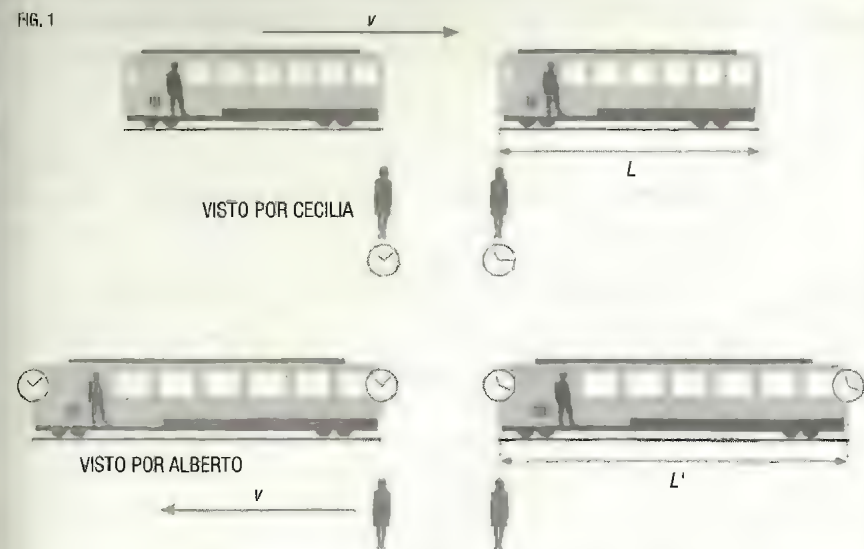
$$L = \sqrt{1 - v^2/c^2} \, L'.$$

Puntos de vista... achatados

Esta ecuación expresa la contracción de la longitud del tren en movimiento cuando es contemplada por un observador en reposo. Para Cecilia, el tren y todos los objetos en su interior están achatados en la dirección del movimiento. En el caso extremo en que un objeto se acerque a la velocidad de la luz, su longitud aparente se aproxima a cero. Podríamos repetir el argumento anterior desde el punto de vista de Alberto, suponiendo que el tren está en reposo y la estación se mueve hacia él con velocidad v . Entonces, Alberto vería que la longitud de la estación se

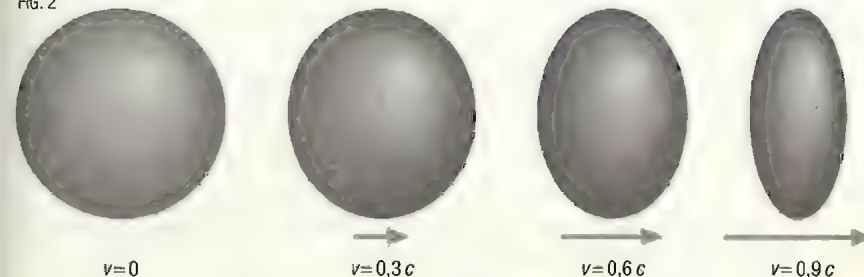
contrae. Por tanto, al viajar a una velocidad próxima a la luz, todos los objetos externos se contraen en la dirección del movimiento. La contracción de Lorentz sufrida por un objeto cuando se aproxima a distintas velocidades se muestra en la figura 2.

FIG. 1



Procedimiento para la medida de la longitud de un tren por un observador en reposo (arriba) y por un observador en el tren (abajo).

FIG. 2



La figura ilustra cómo los objetos en movimiento se contraen en la dirección del mismo. La contracción es mayor cuanto más se acercan a la velocidad de la luz (c).

Cuando cortejas a una bella muchacha, una hora parece un segundo. Pero si te sientas sobre carbón al rojo vivo, un segundo parecerá una hora. Eso es relatividad.

ALBERT EINSTEIN

La dilatación del tiempo puede llevar a paradojas y confusiones. Un reloj en movimiento se atrasa con respecto a un sistema en reposo. Pero, según el principio de relatividad, todos los sistemas inerciales son equivalentes. Podríamos repetir el razonamiento anterior suponiendo que el tren está en reposo y es la estación la que se mueve en sentido opuesto con

velocidad v . Si en la estación se coloca un reloj de luz similar al anterior, sincronizado con el reloj de Cecilia, Alberto tiene todo el derecho a afirmar que es el reloj de Cecilia el que se atrasa aplicando la misma fórmula [2] pero cambiando t por t' . Es decir, cada segundo de Cecilia serían 2,28 segundos para Alberto. ¿Quién de los dos tiene razón? La respuesta es que ambos tienen razón según su sistema de referencia.

Para resolver esta paradoja hay que tener en cuenta que existe una diferencia fundamental entre la medida del tiempo según Alberto y Cecilia. Cuando Cecilia quiere cronometrar el reloj de Alberto, necesita dos relojes sincronizados, ya que debe tomar dos medidas en dos sitios distintos porque Alberto se mueve. Cecilia podría colocar dos cámaras de vídeo separadas una cierta distancia (lo que es equivalente a utilizar dos relojes). Estas dos cámaras empezarían a grabar simultáneamente y a registrar la imagen del reloj de Alberto cuando pasa ante ellas. A continuación, Cecilia no tiene más que reproducir los dos vídeos para determinar cuánto se atrasa el reloj de Alberto.

El hecho de que uno de los observadores utilice dos relojes introduce una diferencia sustancial en la forma en que se mide el tiempo, y ese es el origen de la paradoja, ya que dos sucesos simultáneos en un sistema de referencia no lo son en el otro. Dos relojes sincronizados en el sistema en reposo no lo están en el sistema en movimiento. Esto es debido a que el tiempo se transforma dependiendo de la posición. Si dos relojes están en sitios distintos, marcando el mismo tiempo en el sistema en reposo, en un sistema en movimiento marcarán tiempos distintos. Por tan-

to, según Alberto, Cecilia puso a grabar sus cámaras en tiempos distintos, lo que explica la paradoja.

Resumiendo, la frase «los relojes en movimiento se atrasan» significa que, cuando en un sistema inercial que contiene relojes sincronizados, se cronometra a un reloj que se mueve a velocidad constante relativa, se encontrará que el reloj en movimiento marcha más lentamente.

El viaje al futuro

Sí, viajar al futuro es posible, aunque nada fácil... Si pudiéramos viajar a la velocidad de la luz nos proyectaríamos instantáneamente hacia el mañana, pero eso no es factible. Si queremos resolver la cuestión, deberemos afrontar unos cuantos retos tecnológicos formidables y superar algunas barreras físicas no exentas de peligrosidad.

La técnica del viaje al futuro está perfectamente reflejada en la película *El planeta de los simios* de 1968. En ella, cuatro astronautas, bajo el mando del comandante Taylor (protagonizado por Charlton Heston), realizan un viaje espacial desde la Tierra hacia Alfa Centauro, el sistema estelar más cercano, situado a unos cuatro años-luz. Aunque viajan a una velocidad próxima a la de la luz, su viaje dura varios años, por lo que gran parte lo realizan en el interior de cámaras criogénicas. Pero ocurre un accidente y la nave cae en un planeta. Cuando los astronautas se despiertan, para ellos han pasado solo unos cuantos meses y no saben dónde se encuentran. Taylor no tardará en comprender que en realidad está de nuevo en la Tierra, donde han transcurrido dos mil años, durante los cuales los simios han evolucionado hasta conquistar la totalidad del planeta.

Este método para viajar al futuro ha sido ampliamente explotado por los escritores de ciencia ficción. Pero es algo más que eso. El universo realmente se comporta así. El primero en darse cuenta fue el físico francés Paul Langevin en 1911. Para viajar al futuro, bastaría con subirse a una nave espacial, acelerar hasta alcanzar una gran velocidad, tan próxima a la luz como sea posi-

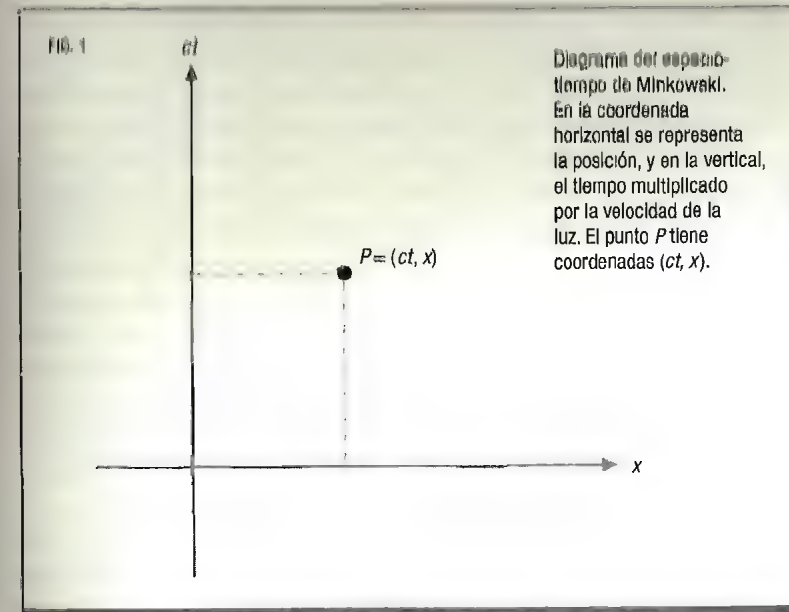
ble, dar la vuelta y volver a la Tierra. Para el astronauta, el tiempo transcurre más despacio. Si él ha envejecido unos meses, en la Tierra podrían haber transcurrido muchos años. ¿Cuántos? Eso depende de la velocidad que alcance la nave y el tiempo que esté viajando. En realidad, la mayor parte del tiempo transcurrirá durante las fases de aceleración y deceleración. La nave deberá acelerar hasta alcanzar su velocidad de crucero, próxima a la luz, luego frenará para dar la vuelta, acelerará de nuevo a velocidad de crucero y, finalmente, se detendrá hasta posarse en la Tierra.

El tiempo que transcurre para el astronauta se denomina *tiempo propio*. La teoría de la relatividad especial permite predecir ese tiempo propio que transcurrirá en un viaje espacial. Para ello hay que aplicar los resultados de la dilatación del tiempo que hemos visto en el capítulo anterior. Pero no se puede utilizar directamente la fórmula [2], que expresa la relación entre tiempos medidos por dos sistemas inerciales, ya que la nave espacial no es un sistema inercial. No se mueve con velocidad constante porque acelera y decelera varias veces. Pero, a tiempos cortos, un reloj acelerado sigue las mismas leyes que un observador inercial, como vamos a ver a continuación.

DIBUJANDO LÍNEAS EN EL UNIVERSO

El concepto del continuo espacio-tiempo se debe al matemático Hermann Minkowski (1864-1909), que había sido profesor de Einstein en Zúrich, y que más tarde reformuló la teoría especial de la relatividad en cuatro dimensiones, que son las que tiene nuestro universo: tres dimensiones espaciales y una temporal. Esto es así porque, según la relatividad, las coordenadas espaciales no pueden considerarse independientemente de la coordenada temporal, ya que la transformación de Lorentz mezcla el espacio y el tiempo. Esto implica que el espacio-tiempo posee unas propiedades geométricas genuinas, que son distintas de las propiedades del espacio tridimensional.

Recordemos que un evento puede representarse por cuatro coordenadas (x, y, z, t) en cierto sistema de referencia inercial.



Esto se puede dibujar como un punto en un diagrama de Minkowski, que representa el espacio-tiempo o espacio de Minkowski (figura 1). Para simplificar, dibujaremos solamente la dimensión x en el eje horizontal y el tiempo t en el eje vertical. En lugar de representar el tiempo en segundos, representaremos el producto del tiempo por la velocidad de la luz, ct . Este producto es el espacio que recorre la luz en el tiempo t . También es la máxima distancia que se puede recorrer en el tiempo t , ya que nada puede ir más deprisa que la luz. Esto se hace así para que todas las coordenadas se expresen en las mismas dimensiones, esto es, en metros.

La historia de una partícula física se representa como una curva denominada *línea de universo* de la partícula. Imaginemos que queremos representar la línea de universo de una abeja que vuela por la habitación. Tendríamos que dibujar en el diagrama todas sus posiciones, x , en todos los instantes posibles, t . Esto genera la curva continua de la figura 2, que representa a la abeja en cuatro dimensiones. La línea de universo de una partícula también se conoce como línea de vida, porque representa

toda la historia de la partícula: el pasado, el presente y el futuro. En el espacio-tiempo todos recorremos una línea de vida desde el pasado hasta el futuro. Aunque esta línea de vida en realidad tiene cuatro dimensiones, podríamos visualizar una proyección tomando todos los fotogramas de la película de nuestra vida y colocándolos el uno sobre el otro en el diagrama de Minkowski.

La línea de universo más simple corresponde a una partícula en reposo. Como su coordenada x nunca cambia, es un segmento de recta vertical (A en la figura 3). Para la partícula en reposo solo transcurre el tiempo. Si la partícula se mueve en sentido positivo a velocidad constante v , su línea de universo es un segmento inclinado un ángulo con respecto a la vertical (B en la figura 3). Este ángulo aumenta con la velocidad (C), pero es siempre menor de 45° , ya que para este ángulo se alcanza la velocidad de la luz (D).

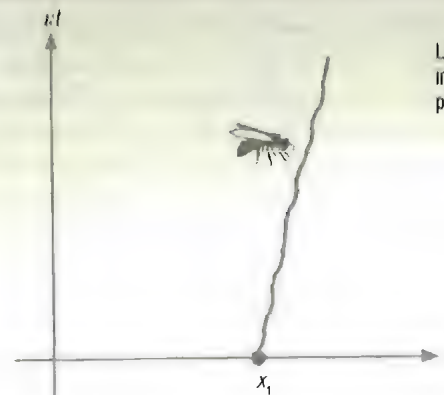
¿Cómo transcurre el tiempo para un reloj que se mueve en una línea de universo? Consideremos un reloj de luz que se mueve a velocidad constante. Como hemos visto en el capítulo anterior, para un observador en reposo la luz en el reloj recorre en un tiempo t la diagonal de un triángulo, cuya base es la distancia x recorrida por el reloj en ese tiempo, y cuya altura, s , es el espacio recorrido por la luz para el observador que se mueve con el reloj. Para evitar confusiones, llamaremos con la letra griega τ (tau) al tiempo propio, es decir, el tiempo del observador que se mueve con el reloj. Entonces $s = c\tau$ (figura 4).

En el capítulo 1, utilizamos la ecuación [1] para calcular el tiempo transcurrido en el sistema en reposo. En este caso estamos interesados en el tiempo propio en el sistema en movimiento. Por tanto, la ecuación [1] nos da directamente la solución del problema. La reescribiremos aquí en la forma

$$s^2 = (ct)^2 - x^2 \quad [3]$$

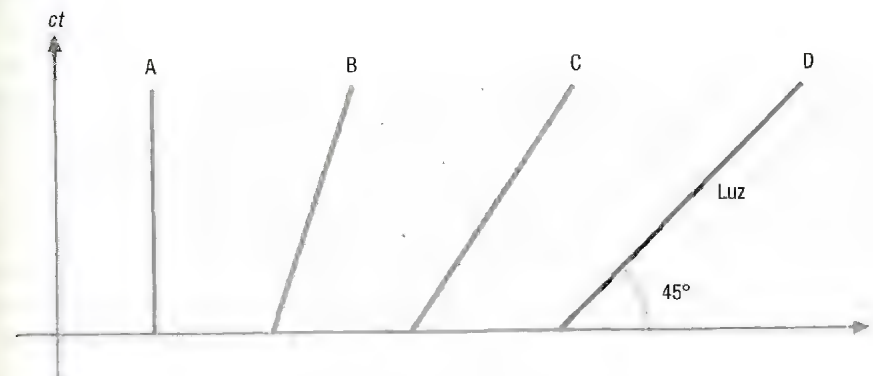
Esta ecuación es fundamental, ya que, además del tiempo propio, define la geometría del continuo espacio-tiempo. La can-

FIG. 2



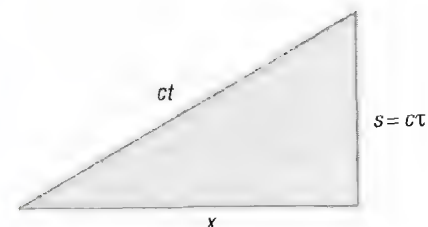
Línea de universo de una abeja que inicialmente se encuentra en la posición x_1 .

FIG. 3



Las líneas de universo de partículas moviéndose a velocidad constante son segmentos de recta. La partícula A está en reposo. La partícula B está en movimiento. La partícula C tiene una velocidad próxima a la de la luz. La línea de universo del rayo de luz D está inclinada 45° .

FIG. 4

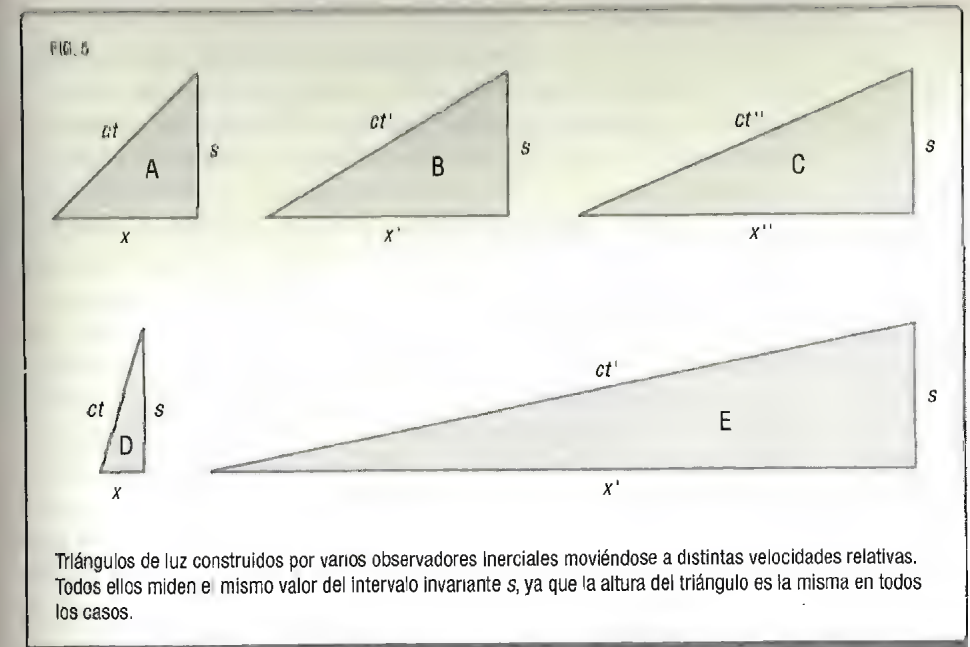


Geometría del triángulo de luz que permite determinar el tiempo propio.

El intervalo s se denomina *intervalo invariante* o *métrica* del espacio-tiempo. Todos los observadores inerciales moviéndose a distintas velocidades relativas que cronometren el tiempo propio del reloj obtendrán el mismo valor para el intervalo, ya que en todos los sistemas los triángulos de luz tienen la misma altura (triángulos A, B, y C de la figura 5). Por tanto, todos estarán de acuerdo en el tiempo propio del reloj. Por eso se dice que el intervalo es invariante. En el caso de un observador que se mueve casi a la velocidad del reloj, la base del triángulo es muy pequeña (triángulo D en la figura) y no habrá mucha diferencia entre su tiempo y el tiempo del reloj. Para un observador que se mueva a una velocidad próxima a la luz con respecto al reloj, la base del triángulo será muy larga (E) y los tiempos serán muy distintos.

La ecuación [3] es la regla para medir la distancia espacio-temporal entre dos sucesos que están separados una distancia x en el espacio y separados cronológicamente un tiempo t . Es la generalización de la distancia entre dos puntos en el espacio tridimensional. Podríamos definir la geometría de un espacio como la regla de medir las distancias. Esa regla es una función matemática llamada métrica, definida por la ecuación [3]. La geometría del espacio-tiempo es distinta a la del espacio tridimensional porque combina las distancias temporales con las distancias espaciales de una forma peculiar, en la que los cuadrados de las distancias espaciales se restan a los de las temporales. En esta geometría el tiempo no es perpendicular al espacio, en el sentido de la geometría euclídea, como se ve en los triángulos de la figura 5. Además, en el espacio tridimensional las distancias al cuadrado son siempre positivas. Pero en el espacio-tiempo el intervalo podría ser negativo o cero debido al signo menos en la ecuación [3]. En cualquier caso, todos los observadores inerciales seguirán coincidiendo en el valor del intervalo, lo que indica que la métrica no depende del observador y es una propiedad intrínseca del espacio-tiempo.

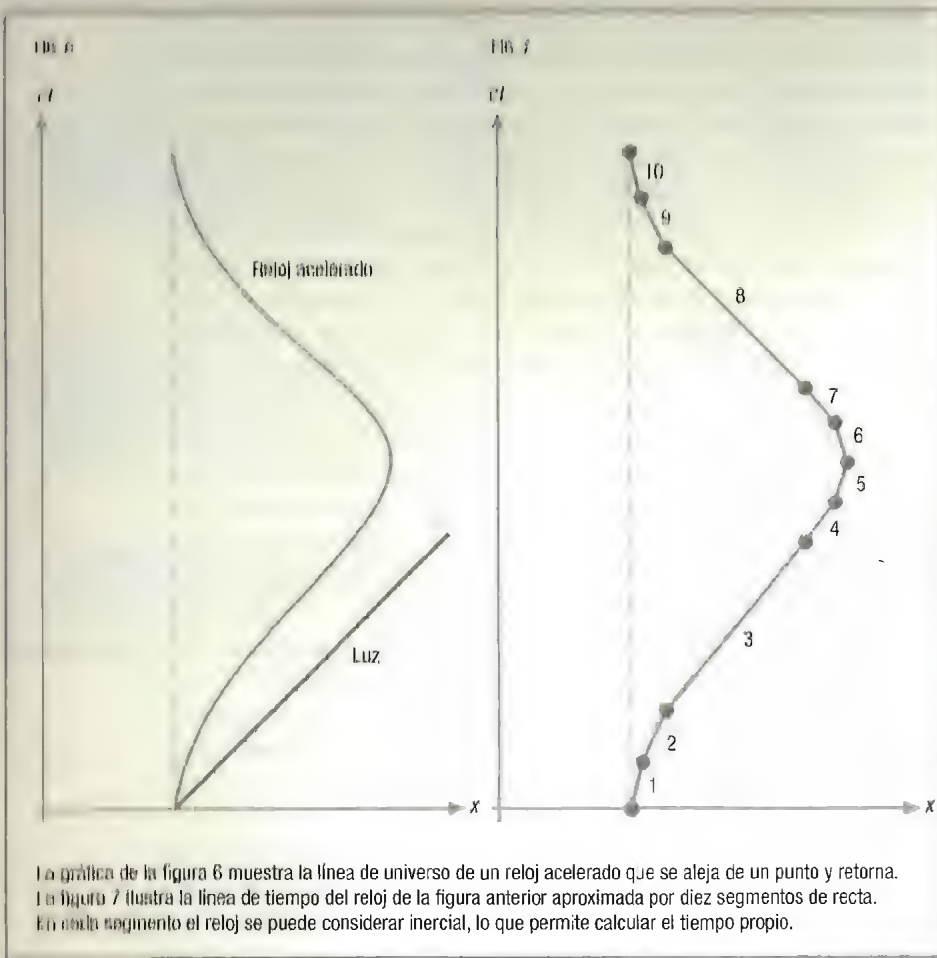
Fijémonos ahora en la consecuencia importante que tiene el signo menos en la métrica. *El tiempo propio es siempre menor que el tiempo del observador.* Esto se debe a que se está restando la distancia recorrida por el reloj. El caso límite se da en la



línea de tiempo de un rayo de luz, cuyo intervalo es cero, ya que se desplaza a la velocidad de la luz y entonces $x = ct$. Por tanto, el tiempo propio de la luz es cero. Para la luz el tiempo no transcurre, no existe.

Consideremos ahora el problema del tiempo propio de un reloj acelerado. La línea de tiempo es una curva suave porque la velocidad (su inclinación) cambia de forma continua, sin cambios bruscos (figura 6). Como la línea de tiempo en este caso no es una línea recta, no se puede aplicar la ecuación [3] directamente.

En este caso debemos utilizar un método matemático denominado *integración*. Consiste en dividir la línea de tiempo en muchas líneas más pequeñas que se aproximen por segmentos de recta. Si dividimos la línea de tiempo del ejemplo anterior en diez segmentos de recta (figura 7), en cada segmento el reloj se puede considerar inercial, lo que permite calcular el intervalo entre los dos extremos del segmento mediante la ecuación [3], lo cual nos proporcionaría el tiempo propio transcurrido en dicho segmen-



to. Para obtener el tiempo propio total bastaría sumar los tiempos propios de todos los segmentos. Eligiendo los segmentos lo suficientemente pequeños, este procedimiento proporciona una buena aproximación al tiempo propio real, con la precisión que deseemos. Este procedimiento es análogo a medir la longitud de una carretera de varios kilómetros usando una cinta métrica recta porque la desviación de la línea recta en una carretera tras recorrer un metro suele ser pequeña y puede despreciarse.

El producto del tiempo propio total por la velocidad de la luz se denomina longitud de la línea de tiempo.

Cabe resaltar que el tiempo propio en cada segmento de la curva es menor que el tiempo que transcurre para el observador inercial, ya que en el intervalo se resta el cuadrado de la distancia recorrida por el reloj. Al sumar todos los tiempos propios de todos los segmentos de recta, se obtiene un tiempo propio total que es menor que el tiempo del observador. En los trayectos en que el reloj viaja a velocidad muy cercana a la luz, el tiempo propio es muy pequeño. Si se lograra alcanzar la velocidad de la luz en un trayecto, el tiempo propio sería exactamente cero en dicho trayecto. La mayor contribución al tiempo propio proviene de los trayectos en que el reloj está acelerando o decelerando. En la figura 7, los trayectos 3 y 8, a velocidad de cruceo cercana a la luz, no consumen prácticamente tiempo propio. Por tanto, se puede controlar el instante futuro a donde queremos viajar. Para ir más lejos en el futuro, simplemente recorreremos más distancia en dichos trayectos.

LA PARADOJA DE LOS GEMELOS

Supongamos que Cecilia y Alberto son hermanos gemelos. Alberto realiza un viaje espacial a una velocidad constante próxima a la luz y regresa a la Tierra tras un año, y encuentra que Cecilia ha envejecido veinte años. Durante la primera mitad del siglo xx hubo cierta controversia contra este argumento debido a una interpretación errónea del principio de la relatividad especial, conocida como *la paradoja de los gemelos*. Si todos los sistemas de referencia son equivalentes, Alberto vería desde su sistema en reposo en la nave espacial que es Cecilia la que ha realizado un viaje a velocidad próxima a la luz y debería ser él quien hubiese envejecido. He aquí la paradoja que incluso algunos físicos reputados llegaron a blandir en contra de los fundamentos lógicos de la relatividad especial.

Pero el hecho es que *no hay paradoja*. El tiempo propio de un reloj es invariante solamente para los sistemas inerciales. Ceci-

¿No escuchas mi llamada?
Aunque estés a muchos
años de distancia,
¿no me escuchas llamándote?

QUEEN, LETRA DE LA CANCIÓN «'39» DEL ÁLBUM
A NIGHT AT THE OPERA.

lla está en un sistema inercial (si des-
prezamos la rotación de la Tierra)
pero Alberto no. Por tanto, Alberto
no puede calcular el tiempo propio
de Cecilia desde su sistema de refe-
rencia no inercial. Si intentara hacer-
lo, obtendría un resultado erróneo,
ya que Alberto no se mueve a veloci-
dad constante respecto a Cecilia. A mitad de camino él deberá
detener la nave e invertir su velocidad para volver a la Tierra. En
ese punto hay un cambio de velocidad y el sistema de Alberto
deja de ser inercial.

La paradoja de los gemelos ha sido comprobada enviando al
futuro un objeto macroscópico. El objeto era un reloj atómico
que viajó alrededor del mundo en un avión. La velocidad era de
1 500 km/h, algo más de una millonésima parte de la velocidad
de la luz. Esto implica un factor de Lorentz de 0,999999999999.
El experimento reveló que el reloj había atrasado un nanose-
gundo con respecto a un reloj atómico en la Tierra.

Los físicos han comprobado experimentalmente que cualquier
tipo de movimiento ralentiza el tiempo de un reloj de acuerdo
con las predicciones de la relatividad especial. En un experimen-
to de 1960 un reloj atómico fue acelerado hasta 66 000 veces la
aceleración de la gravedad, colocándolo en un disco giratorio a
alta velocidad.

La dilatación del tiempo se comprobó con gran precisión. Ba-
sándose en este experimento, el ingeniero Paul J. Nahin, autor
de los libros *Time machines* y *Time travel*, sugirió que podría
utilizarse cierto tipo de máquina centrífugadora como máquina
del tiempo al futuro.

VIAJAR AL FUTURO ES PELIGROSO

La paradoja de los gemelos ha sido demostrada por los experi-
mentos y nos proporciona un mecanismo directo para viajar al
futuro. Con la tecnología actual sería posible producir peque-

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES VIAJAN AL FUTURO

La principal evidencia de la dilatación del tiempo proviene de las partículas elementales.
Todos los días los físicos crean estas partículas al futuro. En los laboratorios de alta energía,
electrones, protones o núcleos atómicos son acelerados casi a la velocidad de la luz y se
hacen chocar entre los átomos de un material. En el LHC (Gran Colisionador de Hadro-
nes) del CERN (la Organización Europea para la Investigación Nuclear, ubicada en Ginebra,
Suiza), los protones alcanzan el 99,9999991% de la velocidad de la luz. Cuando chocan se
producen partículas radiactivas, como muones o piones, que también viajan a gran veloci-
dad. Las partículas radiactivas se desintegran emitiendo radiactividad, que se puede medir
con detectores. Así fue como se descubrió el bosón de Higgs.

La mitad de las partículas radiactivas se desintegran en un tiempo bien establecido que se
llama periodo de desintegración. Por tanto, una muestra de un número suficiente de parti-
culas radiactivas se puede utilizar como un reloj. Rutinariamente se observa que las particu-
las producidas con mayor energía, y por tanto con mayor velocidad, tienen un periodo de
desintegración mayor, es decir viven más tiempo. De esta forma se ha podido comprobar
que el tiempo propio de una partícula viajando a gran velocidad es menor que el tiempo
transcurrido en el laboratorio, es decir la partícula ha viajado al futuro, y que las predicciones
de la teoría de la relatividad espacial son correctas con gran precisión.



En la figura,
simulación de un
evento en el LHC
donde se produce
un bosón de Higgs,
que se desintegra en
haces de partículas,
con una vida media
de $1,56 \cdot 10^{-22}$
segundos.

nos saltos al futuro, de segundos, minutos, o incluso horas. La dificultad aparece al queremos dar un verdadero gran salto, de veinte años o más, hacia el futuro lejano. Entonces existen problemas tecnológicos y barreras físicas, además de serias dudas de que el *crononauta* (nombre que ha sido propuesto para denominar a los eventuales viajeros del tiempo) pudiera soportar los riesgos del viaje.

El primer problema radica en estimar la velocidad apropiada para realizar el viaje. Se necesitan grandes velocidades. Imaginemos que el crononauta viaja durante un año en una nave espacial al 10% de la velocidad de la luz. Por cada año de viaje habrán transcurrido en la Tierra 1,005 años, es decir un año, un día y veinte horas. El 10% de la velocidad de la luz es claramente insuficiente. Nadie se recluiría durante un año en una nave espacial para viajar al futuro y aparecer el año siguiente solo dos días más tarde.

Hemos tabulado los años transcurridos en la Tierra para distintas velocidades de la nave (véase la tabla). Los tiempos se han calculado con la ecuación [2]. A la mitad de la velocidad de la luz transcurre un año y algo menos de dos meses en la Tierra. Al 90% de la velocidad de la luz, dos años y casi cuatro meses, lo que todavía es insuficiente. Para que el salto al futuro valga realmente la pena debemos alcanzar al menos el 99,9% de la velocidad de la luz. Entonces habrán transcurrido 22 años en la Tierra por cada año de viaje. Si viajamos durante 5 años habremos avanzado un siglo. Pasar 5 años en el espacio podría considerarse algo soportable si la meta es avanzar un siglo.

v/c nave	Años en la Tierra por cada año propio
0,1	1,005
0,5	1,155
0,9	2,294
0,99	7,089
0,999	22,37
0,9999	70,71
0,99999	223,6

¿Pero por qué conformarse, al aumentando solo un poco la velocidad, digamos al 99,99% de la velocidad de la luz, habrán transcurrido 70 años en la Tierra por cada año de viaje? A partir de ahí, cualquier minúscula fracción de aumento de velocidad nos acerca más y más a la velocidad de la luz, y la diferencia de tiempo con la Tierra aumenta a gran velocidad. Por cada dígito que le añadimos a la velocidad, el tiempo en la Tierra se triplica con respecto al valor anterior. Al 99,999% en la Tierra transcurren 223 años.

El problema para alcanzar velocidades tan grandes es la energía necesaria. Acelerar desde el reposo requiere aplicar energía. Y esta energía tiene un coste que se incrementa en la misma proporción que los años en la Tierra. Las grandes velocidades no son imposibles, ya que en los aceleradores de partículas se han acelerado protones por encima del 99,999999% de la velocidad de la luz. Pero hacerlo con una nave espacial, muchísimo más pesada que un protón, requiere una cantidad de energía enorme. La nave más veloz que se ha lanzado al espacio (la sonda Juno, con destino a Júpiter) no llega a alcanzar los 300 km/s, una milésima de la velocidad de la luz.

Imaginemos una nave espacial muy ligera de solo 10 toneladas. Esto son 10000 kg. Recordemos que, en física elemental, la energía cinética es $mv^2/2$. Como en esta fórmula aparece el cuadrado de la velocidad, la energía cinética aumenta muy deprisa con la velocidad (figura 8). Cuando la velocidad se duplica, la energía se cuadruplica. Cuando nos acercamos a una décima de la velocidad de la luz, esta energía supera un millón de gigavatios-hora (GWh). Para hacernos una idea, la potencia suministrada por todas las plantas de energía de los Estados Unidos es de unos 450 GW. (Recordemos que un vatio es la unidad de potencia igual a un julio por segundo y que un gigavatio es igual a mil millones de vatios). La energía suministrada en una hora por los Estados Unidos es de 450 GWh. Por tanto, la producción total de energía de ese país en 25 años es de unos 100 millones de GWh.

Pues tantos años han pasado, aunque yo solo he envejecido un año. Los ojos de tu madre veo en tus ojos llorando.

QUEEN, LETRA DE LA CANCIÓN «'39» DEL ÁLBUM
A NIGHT AT THE OPERA.

Esta energía se muestra en la gráfica como una línea horizontal y es algo menor que la energía cinética de nuestra nave moviéndose al 90% de la velocidad de la luz.

Ahora bien, la gráfica de la figura 8 falla en algo. Nos dice que, con algo más de 120 millones de GWh, nuestra nave podría alcanzar la velocidad de la luz. Esto es porque hemos calculado el resultado clásico basado en la física newtoniana. En relatividad especial la fórmula clásica deja de ser válida. Para un observador inercial la energía de una partícula es ahora mc^2 , pero la masa aumenta con la velocidad. La masa en movimiento se obtiene a partir de la masa en reposo, dividiendo por el factor de contracción de Lorentz, el mismo que afecta a la dilatación del tiempo. Como consecuencia de esto, la energía cinética relativista aumenta mucho más rápido con la velocidad que la energía clásica y tiende a infinito para la velocidad de la luz (figura 9).

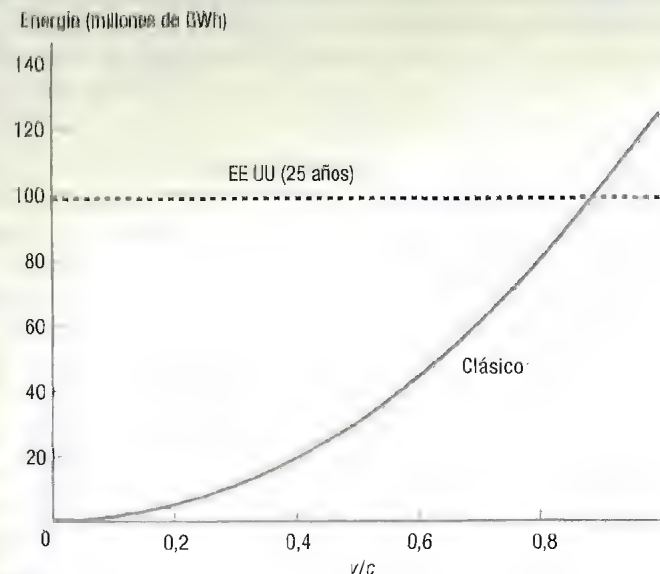
Los efectos de la relatividad especial son dramáticos a altas velocidades. Toda la energía producida por los Estados Unidos en 25 años no podría más que acelerar la nave al 70% de la velocidad de la luz. Para alcanzar el 90% de la velocidad de la luz se requiere quintuplicar la energía. A partir de esta velocidad, la energía se dispara y aumenta cada vez más deprisa. Llegaría un momento en que se superaría la energía total del universo.

Aunque el viaje al futuro es conceptualmente simple y es totalmente posible con la actual tecnología, nos encontramos con la dificultad práctica de que se necesita una descomunal cantidad de energía para realizar un salto al futuro lo suficientemente grande para que valga la pena el esfuerzo realizado. Obviamente, no es posible utilizar gasolina porque se requerirían miles de millones de toneladas para producir esa energía, lo que incrementaría la masa del cohete.

Utilizar combustible nuclear también es inviable. El uranio y el plutonio utilizados en las plantas nucleares proporcionan dos millones de veces más energía que el petróleo. Pero, aun así, serían necesarias miles de toneladas de combustible nuclear.

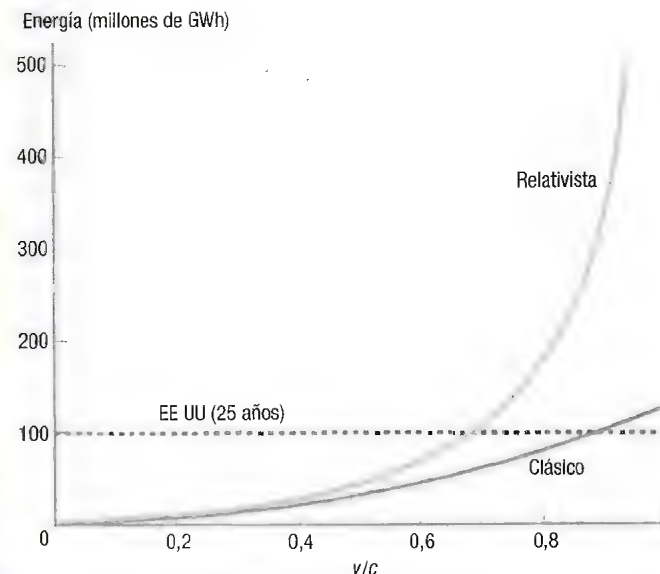
Una posibilidad sería la energía de fusión. Esta es la energía que se produce en el interior del Sol y las estrellas. Cuando dos núcleos de hidrógeno se fusionan se produce un núcleo de

FIG. 8



Energía cinética clásica de una nave de 10 toneladas en función de la velocidad. La línea discontinua es la producción energética total de Estados Unidos en 25 años.

FIG. 9



Gráfica igual que la figura 8, donde se ha añadido la energía cinética relativista de una nave de 10 toneladas.

helio. En esta reacción nuclear se libera una cantidad de energía similar a la que produce la fisión de un núcleo de uranio, con la ventaja de que el hidrógeno es 235 veces más ligero que el uranio (aunque en realidad se necesita deuterio, un isótopo del uranio con el doble de masa). Aunque se está investigando intensamente desde hace décadas y ya existen prototipos de reactores de fusión, la actual tecnología aún no permite utilizar la fusión para producir energía aprovechable. Las expectativas son que hacia la mitad de este siglo una buena parte de nuestra energía sea de fusión. Entonces sería posible una nave espacial propulsada mediante la fusión de hidrógeno. El hidrógeno abunda en el cosmos, de manera que la nave podría repostar combustible recogiendo hidrógeno a medida que viajara por el espacio exterior.

Sin embargo, existe una dificultad que parece insalvable. El hidrógeno más abundante es el hidrógeno ligero, que consiste en un protón rodeado de un electrón. Pero el reactor de fusión requiere deuterio. El núcleo de deuterio consiste en un protón y un neutrón y es poco abundante en el universo. En la fusión, dos átomos de deuterio se unen para producir un átomo de helio. Nuestro reactor necesitaría producir primero deuterio uniendo dos protones para formar un protón y un neutrón. Para ello, uno de los protones debe transformarse en un neutrón mediante una reacción llamada *captura electrónica*. Se trata de un fenómeno muy raro en el que un protón le cede su carga positiva a un electrón y este se transforma en un neutrino (una partícula sin carga y prácticamente sin masa). El protón a su vez se transforma en neutrón. Este tipo de reacciones ocurre en el interior de las estrellas, pero existen serias dudas de que se puedan producir en un reactor.

Nos queda acudir a la mayor fuente de energía que existe: la antimateria. La antimateria es similar a la materia ordinaria, pero las partículas que la componen tienen la carga invertida. Un átomo de antihidrógeno está compuesto de un antiprotón (la antipartícula del protón, con carga negativa) y un positrón (la antipartícula del electrón, con carga positiva). Cuando un átomo de antimateria se aproxima a un átomo de materia, los dos átomos

desaparecen transformándose en energía. Se libera entonces la máxima energía posible $E=mc^2$. Esta es una energía enorme. Un kilogramo de antimateria que se aniquila contra una cantidad equivalente de materia produce la misma energía que una planta de energía eléctrica durante doce años.

Para que nuestra nave de 10 toneladas alcanzara el 99,9% de la velocidad de la luz necesitaríamos unas 100 toneladas de antimateria. Aparte de que el peso de la nave se incrementaría considerablemente, y requeriría aún más energía, la producción mundial de antimateria no supera la millonésima de un gramo, por lo que producir 100 toneladas no será fácil. Además no existe forma de controlar y aprovechar la energía de aniquilación materia y antimateria. Y, aunque la hubiera, seguramente el artefacto sería demasiado voluminoso y pesado para viajar en nuestra nave espacial.

Se han propuesto otras fuentes de energía externas a la nave, como el viento solar, o impulsarse mediante la atracción gravitatoria de los astros que la nave encuentra en su camino, pero todas ellas son insuficientes para acelerar la nave a las velocidades necesarias en el espacio exterior.

No se puede descartar que en el futuro se puedan encontrar nuevas fuentes de energía desconocidas hasta ahora que nos permitieran acelerar nuestra nave al 99,9% de la velocidad de la luz. Pero incluso en ese hipotético caso habría otros problemas. Navegar a tales velocidades sería una pesadilla. Estaría el peligro constante de chocar contra el polvo cósmico, o contra micrometeoritos que, a tales velocidades, se convertirían en proyectiles mortales que impactarían contra nuestra nave al 99,9% de la velocidad de la luz. Una simple mota de polvo a esa velocidad podría agujerear la nave. El casco de la nave tendría que estar protegido con un material resistente a estos impactos.

Al 99,9% de la velocidad de la luz los choques de la nave con átomos de gas en el espacio serían similares a los choques de protones en un acelerador de partículas. Producirían chorros de radiación similares a los rayos cósmicos que atravesarían la nave, suministrando en poco tiempo dosis letales de radiactivi-

dad a sus acompañantes. La nave también debería estar protegida contra este tipo de radiaciones.

Finalmente, aunque se pudieran resolver los problemas energéticos y tecnológicos, nos encontraríamos con el mayor de los problemas: el viaje al futuro sería solo un viaje de ida. Quedaríamos atrapados para siempre en el futuro. No habría forma de volver atrás en el tiempo. Al menos la relatividad especial no nos puede aclarar esta cuestión. ¿Cuál sería la razón de viajar cien años al futuro a no ser la de demostrar que el viaje al futuro es posible? Si el viaje al futuro tiene alguna utilidad, esta requiere poder volver al pasado para contarlo. A no ser que el pasado se hubiera convertido en un lugar invivible.

El viaje al pasado

Sabemos que el espacio-tiempo se curva en las regiones donde se acumulan la materia y la energía del universo, y también que cerca de un campo gravitatorio intenso el tiempo fluye más lentamente. Si se dieran las circunstancias para que la dimensión temporal se doblara sobre sí misma, la puerta para viajar al pasado se abriría ante nuestros ojos.

El tiempo y el espacio son relativos, dijo Einstein. Este era el resultado de su teoría, y una consecuencia del principio de relatividad enunciado en la pág. 24. Los observadores inerciales, que se mueven a velocidad relativa constante, no pueden determinar si están moviéndose o no, ya que las leyes de la física son las mismas para todos. La teoría general de la relatividad extiende este principio a los observadores acelerados, pero con una diferencia: ellos sienten la aceleración debido a la aparición de fuerzas ficticias, como la fuerza centrífuga que nos empuja hacia el lado opuesto al tomar una curva en un automóvil.

Con su teoría general, Einstein pretendía, además, conectar la relatividad con la fuerza gravitatoria. La gravedad es diferente a otras fuerzas debido a que actúa sobre todos los objetos por igual, independientemente de su masa y su composición. Todos los cuerpos caen en un campo gravitatorio con la misma aceleración si despreciamos la resistencia del aire. Esto ya lo ilustró Galileo con sus famosos experimentos en la torre de Pisa, en los que demostró que dos esferas de distinta masa, cayendo desde la misma altura impactaban en el suelo simultáneamente. Y Newton lo explicó: planteó que la fuerza que actúa sobre una partícula es

el producto de su masa por su aceleración, $F = m a$. Por otro lado, según la ley de la gravitación, la fuerza atractiva que ejerce sobre esa partícula un objeto de masa M , alejado una distancia r , es $F = G m M / r^2$. Si se igualan ambas ecuaciones, la masa de la partícula se cancela y su aceleración es $a = G M / r^2$. Por tanto, todos los cuerpos se aceleran por igual debido al campo gravitatorio creado por la masa M , si se encuentran a la misma distancia de esta.

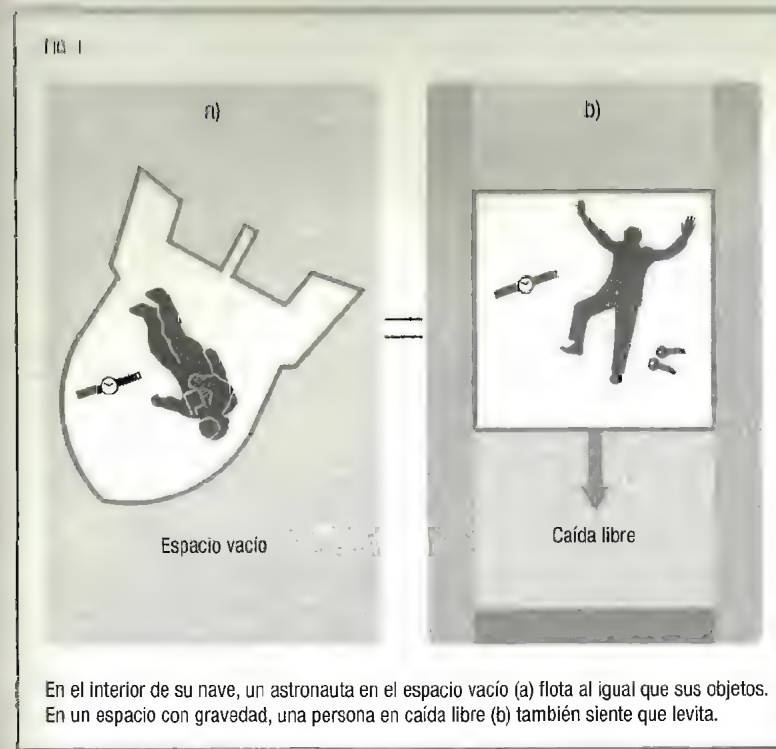
La idea genial de Einstein fue darse cuenta de que esto implica que un hombre que cae del tejado no sentirá su propio peso durante la caída, es decir, la caída libre es equivalente a la *ingravidez*... una sensación que podrá sentir durante un corto lapso de tiempo antes de que se dé el inevitable batacazo.

INGRAVIDEZ VERSUS GRAVEDAD

Imaginemos un astronauta en una nave espacial tan alejada del sistema solar que pueda ignorar la atracción de cualquier astro. (figura 1a), el astronauta flota junto a todos sus objetos en el interior de la nave.

Ahora supongamos que Alberto se halla en la cabina de un ascensor que cae desde una gran altura hacia el suelo, según ilustra la figura 1b. El ascensor no tiene ventanas, y Alberto no tiene modo de saber que está cayendo. Él mismo, la cabina, así como todos los objetos que se hallan en el interior del ascensor caen simultáneamente con la misma aceleración. En ese momento a Alberto se le ocurre hacer un experimento. Suelta su reloj, pero este, en lugar de caer, permanece flotando junto a él. Cuando deja caer sus llaves en el aire sucede lo mismo. Él mismo también siente que levita. Mediante un pequeño impulso, salta hacia arriba y se ve despedido hacia el techo. No siente su peso en absoluto, solo una total ingravidez.

Lo que sucede es que durante una caída libre la gravedad se «desconecta». Por eso los astronautas en órbita sienten la ingravidez, aunque en realidad están «cayendo» siendo acelerados por la Tierra, girando en círculos orbitales. No hay modo de saber si estamos cayendo en un campo gravitatorio o si nos halla-

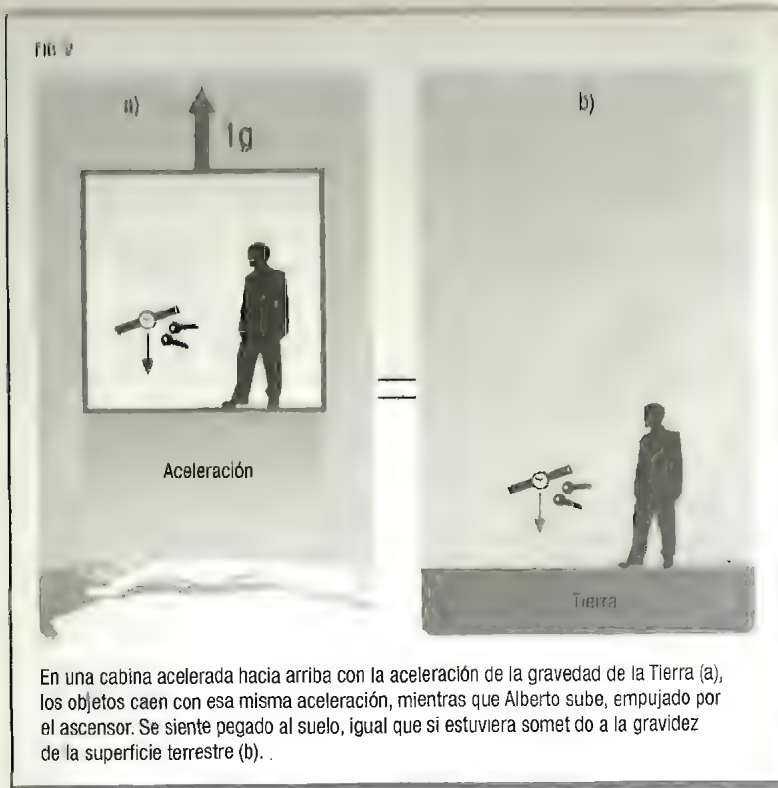


mos en mitad del espacio, alejados de cualquier fuerza gravitacional, como enunció Einstein en el principio de equivalencia:

Para cualquier sistema de referencia en caída libre en un campo gravitatorio, las leyes físicas son las mismas que en un sistema inercial sin gravedad.

La caída libre contrarresta el efecto de la gravedad porque la aceleración produce el efecto de un campo gravitatorio «aparente» en sentido opuesto al campo gravitatorio en el que estamos cayendo. De ahí la ingravidez.

Supongamos que remolcamos la cabina del ascensor donde se halla Alberto al espacio exterior y la aceleramos hacia arriba a 9,8 metros por segundo al cuadrado, según se representa en



la figura 2a. Esta es la aceleración de la gravedad en la Tierra ($1g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Dentro de la cabina, Alberto suelta sus llaves y observa que caen al suelo con una aceleración de $1g$. Desde el punto de vista de un observador en reposo en el exterior, es el suelo del ascensor el que sube acelerando hacia la posición de las llaves, pero Alberto no tiene forma de saberlo. Como sus pies están siendo empujados hacia arriba por el suelo del ascensor, Alberto siente que no puede despegarse del suelo, como si estuviera en reposo sobre la superficie de la Tierra, sometido al campo gravitatorio, tal como se muestra en la figura 2b.

El campo gravitatorio aparente actúa en sentido contrario al de la aceleración. Es decir, todos los objetos se ven atraídos por una fuerza en sentido contrario al movimiento. Cuando viajamos

en un automóvil y aceleramos, nos vemos empujados hacia el asiento como si un campo gravitatorio nos atrayera hacia la parte posterior del coche.

INTERACCIONES CÓSMICAS: GRAVEDAD, TIEMPO Y LUZ

Hay dos efectos que se deducen del principio de equivalencia:

1. La curvatura de la luz: La gravedad afecta a la luz, la atrae y la hace curvarse de la misma forma que a los cuerpos masivos.
2. La dilatación gravitatoria del tiempo: La gravedad hace que el tiempo avance más despacio.

La curvatura de la luz causada por la gravedad de la Tierra es demasiado pequeña para poder apreciarse. Cuando lanzamos una pelota, esta no se desplaza en línea recta porque la gravedad la empuja hacia abajo. Sigue una trayectoria parabólica y cae a la Tierra. La luz hace lo mismo, aunque el empuje gravitatorio de nuestro planeta es tan pequeño y la velocidad de la luz tan grande, que la desviación no es apreciable en la escala de distancias terrestres. La luz, o llega a su destino o se aleja mucho antes de que el efecto de gravedad pueda notarse.

Einstein calculó que un rayo de luz que pasara cerca del Sol se curvaría lo suficiente para ser observado desde la Tierra. Para ello habría que fotografiar las estrellas que hay detrás del Sol durante el día y comparar la imagen con la misma región del espacio durante la noche. La curvatura de la luz debida al Sol provocaría una diferencia entre la posición aparente de las estrellas de día y de noche (cuando el astro rey no se deja ver).

Y una vez más acertó: el efecto fue observado por el astrónomo sir Arthur Eddington durante el eclipse total de Sol del 29 de mayo de 1919. Este célebre hallazgo saltó a los titulares de los periódicos en todo el mundo. Las observaciones habían confirmado la teoría de Einstein y lo catapultaron para siempre a la fama.

Si la gravedad ralentiza el tiempo y este avanza más despacio en la superficie de la Tierra, podríamos preguntarnos por qué no tenemos que poner en hora los relojes tras visitar, por ejemplo, el Empire State Building o después de un viaje en avión. La respuesta es que las diferencias de altura cerca de la superficie

Todas las cosas prefieren vivir donde envejezcan más lentamente y la gravedad las empuja hacia allá.

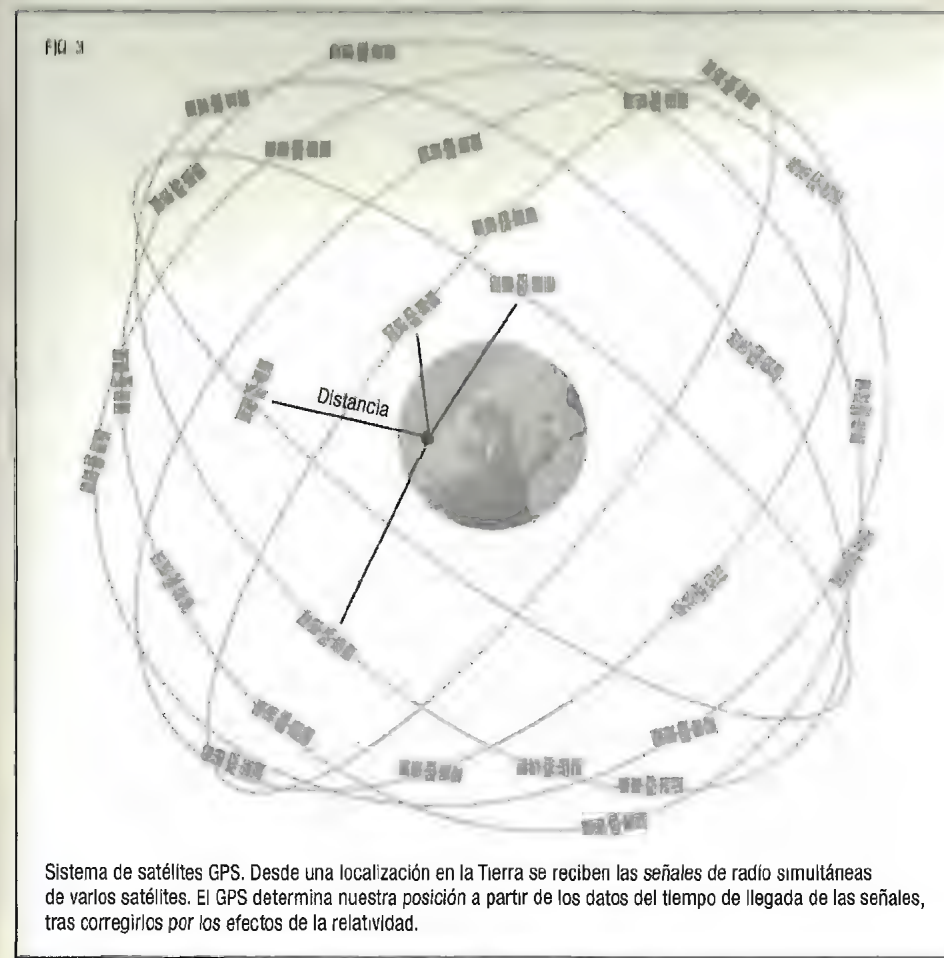
KIP THORNE

de la Tierra son demasiado pequeñas para producir un cambio de gravedad apreciable, ya que el campo gravitatorio terrestre es muy débil. La ralentización del tiempo fue comprobada experimentalmente en 1959 por el físico estadounidense Robert V. Pound y su alumno Glen A. Rebka,

cundo compararon dos relojes atómicos colocados en el tejado y en el sótano de un edificio en la Universidad de Harvard. De acuerdo con la relatividad general, el reloj del sótano marchaba 210 trillonésimas de segundo más despacio que el situado en el tejado.

Los efectos de la gravedad sobre el tiempo son esenciales para la tecnología de posicionamiento GPS, gracias a la cual nuestro *smartphone* puede indicar nuestra posición con 10 m de exactitud. Los GPS calculan con precisión los lugares comparando las señales emitidas por relojes atómicos colocados en 27 satélites que orbitan alrededor de la Tierra a más de 20000 km de altura (figura 3). Desde cualquier punto de nuestro planeta solo se pueden ver entre 4 y 12 satélites al mismo tiempo. Cada uno de ellos envía una señal de radio al *smartphone* con la información de la posición del satélite y el tiempo en que se envió la señal. El teléfono registra el tiempo de llegada de la señal y lo compara con el tiempo en que se envió para calcular así la distancia del satélite. Conociendo las localizaciones y las distancias de varios satélites, una triangulación permite al *smartphone* determinar su propia localización.

Tanto la relatividad especial como la general afectan al GPS. La relatividad especial influye porque los satélites se están moviendo a gran velocidad con respecto a la Tierra. Esto significa que, para el receptor terrestre, el reloj del satélite funciona más



Sistema de satélites GPS. Desde una localización en la Tierra se reciben las señales de radio simultáneas de varios satélites. El GPS determina nuestra posición a partir de los datos del tiempo de llegada de las señales, tras corregirlos por los efectos de la relatividad.

lentamente. En concreto, se atrasa 7 microsegundos al día. Por el contrario, según la relatividad general, el reloj ubicado en el satélite va más deprisa que el de la superficie, adelantando 46 microsegundos diarios debido a la baja gravedad. El adelanto neto del reloj del satélite es de 39 microsegundos al día. Para determinar la posición de un objeto con un margen de error de entre 5 y 10 m se requiere medir el tiempo con una precisión de 0,04 microsegundos. Si el sistema GPS no tuviera en cuenta

LA CURVATURA DE LA LUZ

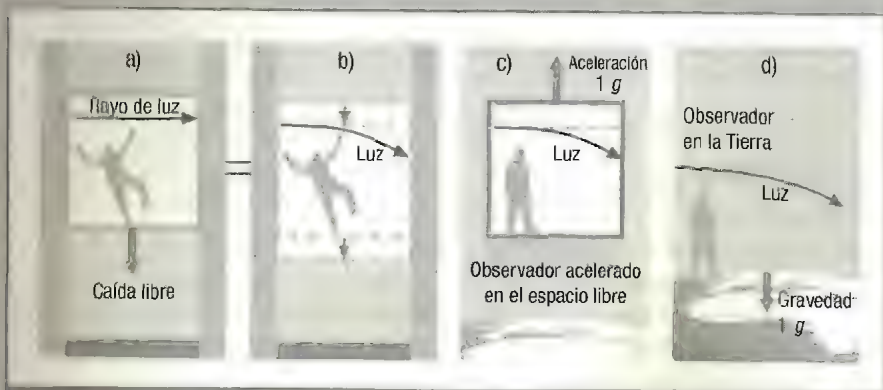
Experimentemos con el espacio. Un ascensorista proyecta un rayo láser desde la nave espacial con una velocidad constante. Pasa el tiempo en su sistema, pero al observar la luz al regresar al fondo, la trayectoria del rayo en su cámara está curvada en la pared de la nave frente a él, a la altura mínima. Inagotablemente, ahora que Alberto proyecta un rayo láser desde el ascensor en el espacio libre. Según el principio de equivalencia, el interior del ascensor es equivalente a un sistema inercial en el espacio libre. Por tanto, Alberto verá cómo el rayo sigue en línea recta y se proyecta en la pared del ascensor a la misma altura (figura a).

Un rayo de luz y una parábola

Un observador en reposo en la Tierra verá que, cuando el rayo de luz llega a la pared del ascensor, la cámara se ha desplazado hacia abajo cierta distancia. El rayo de luz no ha viajado en línea recta, sino que ha trazado una parábola (figura b). Si repetimos el experimento cuando el ascensor acelera hacia arriba a $1g$ en el espacio, Alberto observará que el rayo de luz se curva hacia abajo trazando una parábola en sentido contrario a la aceleración (figura c). Esto es debido a que la luz tarda un tiempo en alcanzar la pared, durante el cual la cámara se ha desplazado hacia arriba cierta distancia. El campo gravitatorio aparente que siente Alberto ha curvado la trayectoria de la luz. El efecto de la curvatura de la luz no ocurrenando el mismo en la superficie de la Tierra en presencia de gravedad (figura d).

Masa equivale a energía

La curvatura de la luz por la gravedad está asociada a la ecuación de Einstein, $E=mc^2$, que indica la equivalencia entre masa y energía. La luz transporta energía en forma de ondas electromagnéticas propagándose por el espacio. Esta energía es equivalente a una cantidad de masa $m=E/c^2$. Esta masa equivalente es muy liviana, ya que estamos dividiendo por la velocidad de la luz al cuadrado. Por ello la luz apenas se curva en el campo gravitatorio terrestre.



los efectos de la relatividad sobre la marcha del tiempo, sería imposible la navegación via satélite.

LA CURVATURA DEL ESPACIO-TIEMPO

Hemos visto que la gravedad atrasa los relojes y curva la luz. Pero la dilatación gravitatoria del tiempo no es suficiente para permitir el viaje al pasado. Incluso acercándonos con una nave espacial a un cuerpo masivo con un intenso campo gravitatorio, como máximo conseguiríamos que el tiempo transcurriera muy despacio. Y al volver a la Tierra, aterrizariamos en el futuro, no en el pasado.

La posibilidad del viaje al pasado se fundamenta en el resultado más asombroso de la relatividad general: el mismo espacio-tiempo se curva o distorsiona debido a la materia y energía del cosmos. En ausencia de gravedad, el espacio-tiempo es plano y las partículas y los rayos de luz se mueven a velocidad constante en línea recta. En cambio, cuando la gravedad está presente las partículas y la luz se aceleran y se curvan, moviéndose a lo largo de unas trayectorias denominadas *geodésicas*, que son las curvas más rectas que se pueden trazar en un espacio curvo.

Por ejemplo, en la superficie curva de la Tierra las líneas geodésicas son porciones de círculos máximos. Estos son círculos similares al ecuador, cuyo plano divide a la Tierra en dos hemisferios iguales. En nuestro planeta, la distancia más corta entre dos puntos se mide a lo largo del círculo máximo que los une.

El efecto de la materia sobre la curvatura del espacio-tiempo puede visualizarse mediante un símil bidimensional. Pensemos en una cama elástica circular totalmente tensa, de forma que su superficie es plana. Si hacemos rodar una pequeña bola por su superficie, esta se moverá en línea recta. Sin embargo, si colocamos una piedra pesada en el centro, la superficie ya no será plana; la piedra se hundirá formando una depresión de superficie curva (figura 4). Si ahora hacemos rodar la bola, esta comenzará a moverse en línea recta, pero cuando se acerque a la depresión su trayectoria se alterará, ya que la curvatura de la superficie



La curvatura gravitatoria del espacio-tiempo es similar a la curvatura de una cama elástica al colocar una piedra pesada en su centro. Una bola rodaría por la superficie trazando una línea curva o geodésica, que es la línea más recta posible sobre la superficie.

afectará su movimiento. La bola se moverá a lo largo de una trayectoria curva, acercándose cada vez más a la depresión, como si esta la atrajera. Si no tiene suficiente velocidad, la bola acabará por caer en el agujero.

En este ejemplo la superficie de la cama elástica representa el espacio tridimensional, con una dimensión menos. La depresión de la cama elástica causada por la piedra ilustra la curvatura del espacio en torno a un cuerpo masivo, como una estrella. También hay una curvatura del tiempo, pero no está representada en la figura. La tercera dimensión nos permite visualizar la curvatura de un espacio bidimensional (la superficie de la cama elástica) en una perspectiva desde fuera de la superficie. Para visualizar la curvatura del espacio tridimensional necesitaríamos una cuarta dimensión desde donde poder contemplarla.

Podríamos imaginar al espacio tridimensional como una hipersuperficie de tres dimensiones inmersa en un espacio con una dimensión extra, denominada hiperespacio. Si añadimos la dimensión temporal, entonces el *hiperespacio-tiempo* tendría cinco dimensiones. La dimensión extra sería la quinta dimensión.

En la teoría general de la relatividad, la presencia de materia y energía distorsiona la estructura geométrica del espacio-tiempo del mismo modo que la piedra curva la superficie de la cama elástica. En el espacio-tiempo las partículas y la luz se mueven siguiendo curvas geodésicas al igual que la bola se curva sobre la superficie de la cama elástica, siguiendo la línea más recta posible.

Según la descripción clásica de Newton, la Tierra se mueve orbitando alrededor del Sol porque este la atrae con una fuerza gravitatoria. En la descripción relativista de Einstein, el Sol curva el espacio-tiempo en sus cercanías, haciendo que los planetas se muevan a lo largo de las curvas más rectas posibles en este espacio-tiempo curvo. De este modo la gravedad se reduce a la geometría del espacio-tiempo curvo. La curvatura le indica a la materia cómo debe moverse y la materia le indica al espacio cómo debe curvarse. La teoría de la relatividad general se sintetiza en las ecuaciones de campo de Einstein que pueden expresarse esquemáticamente en la forma:

$$\text{Curvatura} = \text{Densidad de materia y energía.}$$

Esta es una forma compacta de representar un sistema de diez ecuaciones que determinan la curvatura de un espacio de cuatro dimensiones. Cada superficie bidimensional contenida en el espacio-tiempo puede curvarse de forma distinta, de acuerdo con la distribución espacial de materia y energía. Las diez ecuaciones de Einstein expresan la dependencia de las componentes de la curvatura en todas las direcciones.

Existen diversas formas de determinar la curvatura del espacio visto desde dentro, sin necesidad de postular la existencia del hiperespacio. Todas se basan en determinar las propiedades de las formas geométricas simples, como las rectas, los círculos y los triángulos. En un universo curvo, las leyes de la geometría son distintas de las leyes de la geometría euclídea del espacio plano.

Por ejemplo, pongamos que en un espacio plano la suma de los ángulos de un triángulo es 180° . Los triángulos en un espacio curvo no cumplen esa propiedad. En el caso de una esfera, con

curvatura positiva, la suma de los ángulos es mayor de 180° . En el caso de una silla de montar, de curvatura negativa, la suma de los ángulos es menor de 180° .

Además, en un espacio plano dos rectas paralelas nunca se cortan y solo hay un punto por el que pasa una recta paralela a una recta dada. En el espacio de curvatura positiva, las rectas paralelas (geodésicas o círculos máximos) se cortan. En el espacio de curvatura negativa, existe un punto por el que pueden trazarse infinitas rectas paralelas a una recta dada.

¡PELIGRO! SE AVECINAN FUERZAS DE MAREA

Un crononauta dispuesto a viajar en el tiempo utilizando un agujero negro u otra fuente de gravedad extrema, como un agujero de gusano, se enfrentará al peligro de las fuerzas de marea, un efecto secundario de la fuerza de gravedad detectable si nos desplazamos por una porción del espacio-tiempo lo bastante grande como para percibir su curvatura.

Normalmente no apreciamos la curvatura de la Tierra, ya que, en pequeñas porciones, su superficie aparenta ser plana. Pero si la dividimos en cuadrados de cien kilómetros de lado, como en un mapa de carreteras, e intentamos recomponer el puzle uniendo esas casillas sobre un plano, descubriremos que cada una de ellas debe ser girada y ligeramente distorsionada para que encaje con los cuadrados precedentes. La curvatura se va acumulando imperceptiblemente a lo largo de pequeños recorridos y sus efectos sobre la geometría solo llegan a ser apreciables a grandes distancias. Si unimos suficientes cuadrados, nos daremos cuenta de que es imposible cuadricular la Tierra manteniendo constante la escala de distancias en un mapa plano. Por ello, en un mapa mundi hay que recurrir a un sistema de proyección donde las distancias sobre el mapa no corresponden a las reales y las formas de los continentes deben alterarse al representarse en una superficie plana.

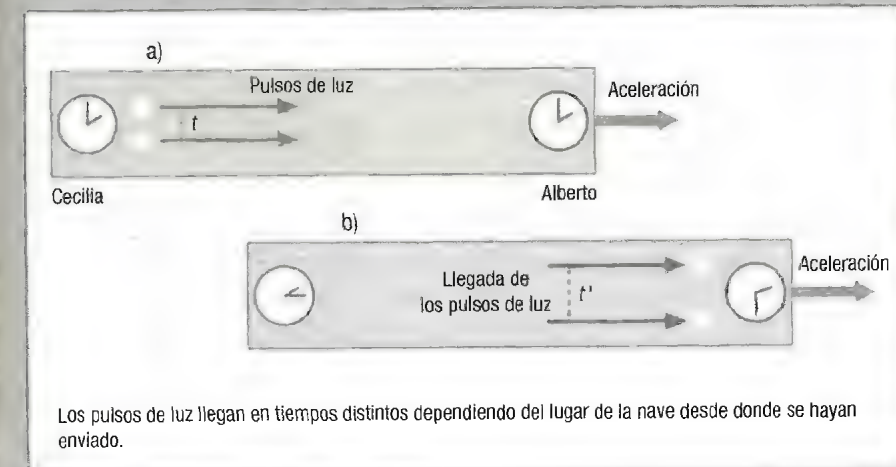
En el espacio-tiempo ocurre algo similar. A pequeñas distancias puede considerarse plano, lo que es otra forma de expre-

LA GRAVEDAD MUEDE EL TIEMPO

En la última sección vimos cómo el tiempo cambia al contemplarlo en la teoría de la relatividad postula-
la por Einstein. Utilizaremos ahora que la gravedad está íntimamente vinculada al espacio y al tiempo; de hecho, la gravedad los deforma. Veamos un ejemplo, protagonizado por Alberto y Cecilia. Imaginemos ahora que nuestros amigos viajan en una nave espacial por el espacio vacío. Cecilia está en la parte posterior de la nave y tiene un reloj programado para enviar pulsos de luz a intervalos de tiempo t (figura a). Alberto se halla en la delantera y tiene otro reloj que recibe los pulsos y los registra a intervalos t' (figura b). Si la nave avanza con aceleración constante, su parte anterior se mueve hacia delante, cada vez más rápido, lejos de los pulsos de luz. La luz viaja a velocidad constante, pero la nave no. Por tanto, los pulsos de luz que envía el reloj de Cecilia cada vez tardan más tiempo en llegar a Alberto. También el intervalo entre pulsos t' que registra Alberto es mayor que el de Cecilia. Si ella envía pulsos cada segundo, Alberto podría registrarlos cada dos segundos. Para él, el reloj de Cecilia marcha más lento, ya que un segundo de Cecilia corresponde a dos segundos de Alberto.

Una percepción cambiante

Si Alberto enviara pulsos de luz a Cecilia, ocurriría lo contrario. La parte posterior de la nave se movería cada vez más deprisa hacia los pulsos de luz de Alberto, por lo que los pulsos de luz sucesivos se recibirían también más deprisa. Para Cecilia, el reloj de Alberto funciona más rápido. Aplicando el principio de equivalencia, en el interior de la nave se siente un campo gravitatorio que empuja hacia la parte posterior, donde se encuentra Cecilia. Esto quiere decir que un reloj que se desplace en sentido contrario de un centro de atracción gravitatorio marchará cada vez más deprisa.



sar el principio de equivalencia. Un observador en caída libre no siente la gravedad, no detecta la curvatura. Para él, el espacio-tiempo es plano. En un pequeño entorno del espacio-tiempo el campo gravitatorio puede considerarse constante. Todos los objetos se mueven juntos con la misma aceleración, siguiendo líneas geodésicas paralelas que no se cortan. Como su posición relativa no cambia, no están sometidos a fuerzas.

Pero el principio de equivalencia deja de ser aplicable cuando consideramos una porción suficientemente extensa del espacio-tiempo donde la curvatura sí es apreciable. En ese caso, un observador en caída libre percibirá los efectos de esa curvatura en forma de fuerzas de marea, porque la gravedad cambia apreciablemente de un extremo al otro del sistema de referencia. Objetos situados en puntos diversos sentirán distinta fuerza gravitatoria y se moverán con una aceleración diferente. Por ejemplo, los planetas del sistema solar se encuentran en caída libre hacia el Sol y cada uno presenta su propia aceleración.

Las fuerzas de marea son fuerzas gravitatorias de estiramiento y de compresión que actúan sobre los cuerpos extensos. Las descubrió Isaac Newton en su teoría de la gravitación y las utilizó para explicar las mareas oceánicas. La gravedad de la Luna atrae con más fuerza la cara anterior de la Tierra que la posterior (figura 5 izquierda). Las fuerzas sobre los lados de la Tierra se inclinan ligeramente porque se dirigen hacia el centro de la Luna. Puesto que está en caída libre, el sistema de referencia de la Tierra solo percibe la diferencia entre estas fuerzas y su valor medio. La cara de la Tierra que mira a la Luna advierte un estiramiento hacia esta. La cara del lado opuesto siente un estiramiento en dirección contraria a la Luna y sus laterales sienten una compresión (figura 5 derecha). Esto produce marea alta en las caras anterior y posterior de la Tierra y mareas bajas en los laterales.

Las fuerzas de marea son consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo por la Luna. Aunque la gravedad de nuestro pequeño satélite es relativamente pequeña, su efecto resulta apreciable sobre los extensos océanos de la Tierra.

UNA HORMIGA TOMANDO UNA CUIVA.

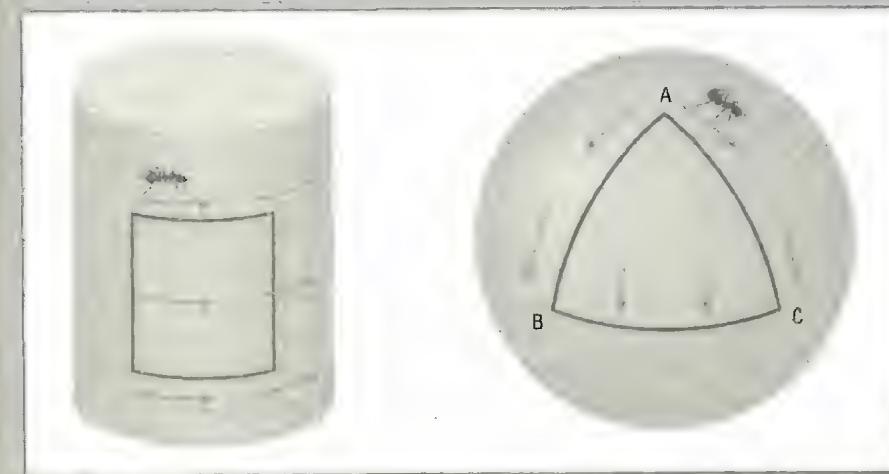
La curvatura del espacio-tiempo se puede medir trasladando una porción infinitesimal denominada *flecha de transporte* (transported vector) en una línea cerrada en la superficie (o un cilindro, tal como se ilustra en la figura de la izquierda). El cilindro representa el espacio-tiempo. La hormiga puede avanzar por esta superficie sin tener curvatura moviéndose alrededor de un camino cerrado y manteniendo su cuerpo siempre paralelo a su posición anterior. En la figura la hormiga se mueve hacia adelante mediante una flecha que indica la orientación de su cuerpo (y no la dirección de su movimiento). La hormiga vuelve a su posición original sin experimentar ninguna rotación.

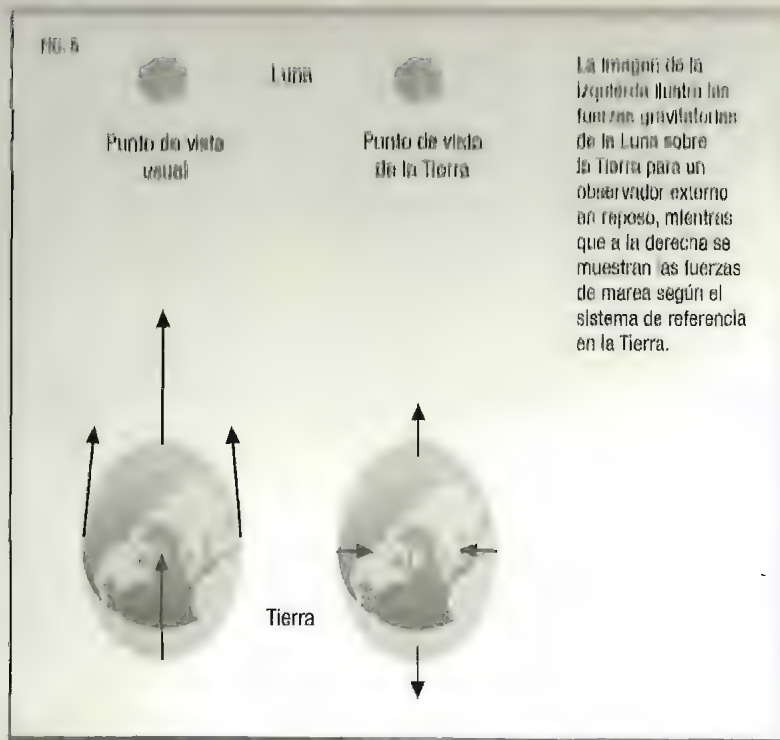
El mundo en una esfera

Si la hormiga hace lo mismo en la superficie de la esfera (figura de la derecha), al recorrer el camino A-B-C-A transportándose paralelamente a sí misma, no vuelve a su posición original, sino que su cuerpo ha girado un ángulo. Dicho ángulo de giro permite calcular la curvatura de la superficie sobre la que camina.

Cuestión de curvatura

En el espacio-tiempo de cuatro dimensiones el método para determinar la curvatura es similar. Una flecha trasladada paralelamente en un camino cerrado no coincide con la flecha inicial. La curvatura es proporcional a la diferencia entre ambas. Las cuatro dimensiones añaden la complicación de que las curvas cerradas pueden recorrerse en varios planos y las flechas pueden apuntar en direcciones adicionales fuera del plano de la superficie de la esfera mostrado en la figura de la derecha, que aquí está restringida a dos dimensiones. No existe una única curvatura, sino que hay muchas de ellas, correspondientes a los distintos planos en que nos movamos y a las distintas direcciones iniciales y finales de la flecha.





COLAPSO TEMPORAL EN UN ABISMO NEGRO

En la película *Interstellar*, dirigida por Christopher Nolan, se ofrece una fiel descripción de un hipotético viaje en el tiempo por un agujero negro. La película narra un viaje hasta los límites del universo y más allá, hasta la quinta dimensión. El guion y los efectos visuales de *Interstellar* están basados en la ciencia real. El físico Kip Thorne, del Instituto Tecnológico de California, uno de los mayores expertos en gravitación y agujeros negros y productor ejecutivo de la película, realizó los cálculos matemáticos para que todos los hechos narrados en el filme fueran científicamente precisos.

En la película, la nave espacial *Endurance* viaja hasta el inmenso agujero negro en rotación llamado *Gargantua*, cuya ma-

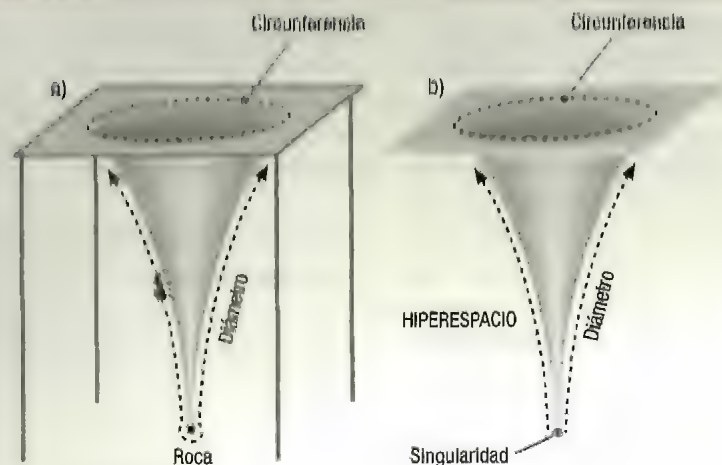
sa es de 100 millones de soles. El planeta de Miller orbita alrededor del agujero a una distancia próxima al horizonte de sucesos. Mientras la nave espacial se mantiene en una órbita alejada del agujero, tres astronautas bajan en un transbordador al planeta de Miller, el cual soporta las condiciones más extremas de la curvatura del espacio-tiempo. Allí, el tiempo transcurre mucho más lentamente que en la nave. Concretamente, una hora en este planeta suponen siete años en la nave espacial. En este planeta las fuerzas de marea lo achatan y lo estiran, produciendo olas en el mar de más de un kilómetro de altura. Los exploradores logran regresar varias horas después, para descubrir que el astronauta que había quedado en la nave ha envejecido veinte años.

El resultado esencial de esta investigación es una comprensión clara de por qué las singularidades de Schwarzschild [agujeros negros] no existen en la realidad física.

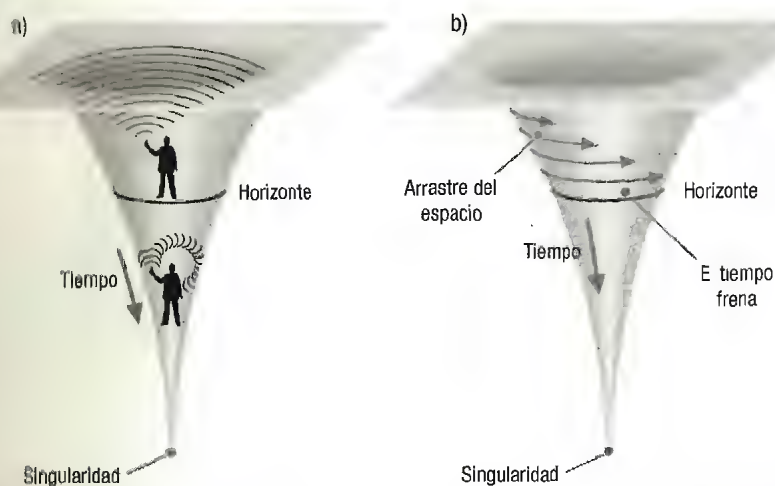
ALBERT EINSTEIN EN UN ARTÍCULO
CIENTÍFICO DE 1939

Los efectos de la gravedad sobre el espacio-tiempo son pequeños en nuestro sistema solar. Pero existen objetos en el universo cuyos campos gravitatorios son tan intensos que dichos efectos son enormes. El astro más asombroso de todos es un agujero negro, una estrella que ha colapsado por completo, formando un agujero en el espacio con un borde definido de donde nada puede escapar, debido a una fuerza gravitatoria tan intensa que ni siquiera la luz puede salir. Al acercarnos a un agujero negro, la curvatura del espacio-tiempo aumenta hasta alcanzar una minúscula región donde la curvatura es infinita. Esto es lo que se llama una *singularidad*. Las fuerzas de marea son infinitamente intensas, tanto, que son capaces de estirar y comprimir la materia hasta que esta deja de existir.

Pensemos en una cama elástica tras depositar en su centro una roca de masa infinitamente grande. Suponiendo que el material se pueda estirar indefinidamente, la roca produciría un enorme agujero en la cama elástica (figura 6a). Para una hormiga que intentara atravesarlo, su diámetro sería inmensamente grande, mucho mayor de lo que cabría esperar por el tamaño de la circunferencia del agujero.



En esta cama elástica (a) la curvatura ha sido generada por una roca infinitamente pesada colocada sobre su superficie. El diámetro que observa la hormiga en relación con la circunferencia del agujero no se corresponde con la geometría euclídea. En la figura b se aprecia la curvatura de una sección ecuatorial de un agujero negro observada desde el hiperespacio.



Un observador que cae en un agujero (a) puede emitir señales de radio hasta que cruza el horizonte. Entonces las señales quedan atrapadas y la flecha del tiempo lo arrastra hacia la singularidad. La figura b muestra el proceso de arrastre del espacio por un agujero negro en rotación.

Tomemos una rodaja del espacio-tiempo que corte al agujero negro por su ecuador. Vista desde el hiperespacio, esta sección del espacio-tiempo se curvaría de forma similar a la cama elástica, reemplazando a la roca por una singularidad (figura 6b).

Si nos acercamos a un agujero negro, estaremos relativamente a salvo hasta llegar a una distancia denominada horizonte de sucesos, esa frontera del espacio-tiempo donde los eventos que tienen lugar a un lado aún no afectan al otro. Una vez que atravesemos ese horizonte seremos atraídos inexorablemente hacia la singularidad. Cualquier señal que intentemos transmitir tras cruzar al otro lado será arrastrada hacia dentro con nosotros. Y nadie, desde fuera, podrá verla jamás (figura 7a).

El interior del agujero negro es una trampa mortal causada por la curvatura del tiempo. El tiempo fluye más lentamente a medida que nos acercamos al horizonte de sucesos. En ese horizonte el tiempo se detiene y experimentamos una atracción gravitatoria tan intensa que ni siquiera la luz puede contrarrestar.

Los agujeros negros pueden rotar sobre un eje, como la Tierra, formando un remolino que arrastra vertiginosamente al espacio-tiempo a su alrededor, enrollándolo y retorciéndolo. Como el aire en un tornado, el espacio gira más rápidamente cerca del centro del agujero y más lentamente a medida que nos alejamos. Cualquier objeto que caiga hacia el horizonte del agujero se verá arrastrado en un movimiento de rotación a su alrededor, como cuando una hoja es arrastrada irremisiblemente por el viento de un tornado (figura 7b).

LAS CURVAS TEMPORALES CERRADAS: MÁQUINAS DEL TIEMPO

Tras nuestro recorrido por el espacio-tiempo estamos en condiciones de abordar la difícil cuestión del viaje al pasado y examinar si las leyes de la relatividad general lo permiten. Si una partícula se mueve hacia atrás en el tiempo, suponiendo que esto sea posible, la línea de universo de dicha partícula en el diagrama de Minkowski, para un observador en reposo, debe curvarse hacia

HABIEMOS DE AGUJEROS NEGROS

El agujero negro, también conocido como el "bulto", es un objeto celeste en el que la gravedad es tan intensa que nada puede escapar de su poder de atracción. Incluso la luz, que debería poder escapar, queda atrapada en un espacio tan pequeño que no puede escapar. Hasta el punto de que la luz que escapa de un agujero negro se convierte en un "bulto" que no puede escapar. El agujero negro es tan pequeño que no puede ser visto directamente. Sin embargo, se sabe que existen y que todos los objetos que se acercan a ellos, ya sea la concentración de materia o la velocidad que los atrae, atraen a la materia de la zona que los rodea y la comprime a un tamaño infinitesimal.

Una gravedad infinita

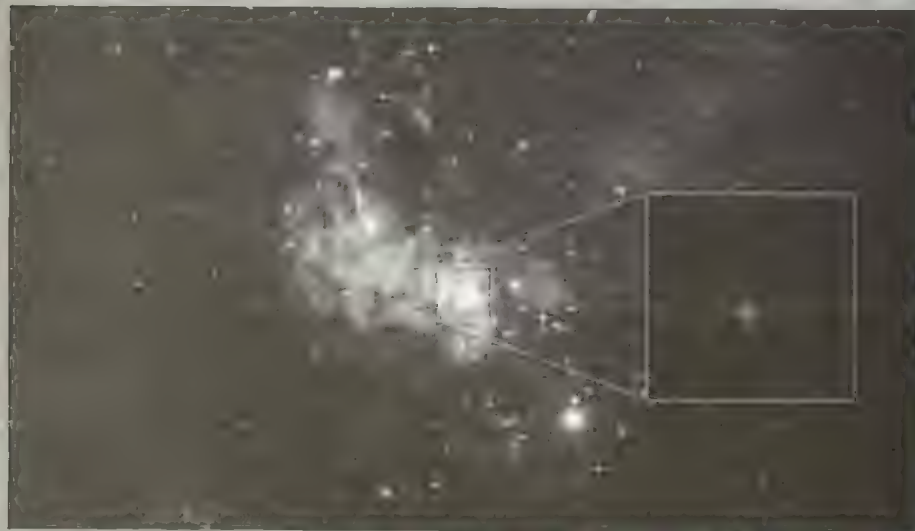
En los años treinta del siglo el físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar y el estadounidense Hans Bethe demostraron que tal compresión sí podía tener lugar en una estrella cuando las reacciones nucleares que se producen en las estrellas activas liberan enormes cantidades de energía, produciendo una presión hacia el exterior que contrarresta la atracción de la gravedad. Cuando el combustible nuclear se consume, esa presión disminuye y la gravedad comprime y contrae la estrella. Si esta no tiene suficiente masa, la contracción cesa porque la gravedad no es lo bastante intensa para comprimir los electrones y los núcleos atómicos, que resisten el empuje. Una estrella con la masa del Sol formará una enana blanca y comprimirá el volumen de la Tierra. Una estrella con dos o tres veces esa masa formará una estrella de neutrones comprimida en un volumen similar al del barrio de Manhattan de Nueva York. Una estrella todavía más masiva formará un agujero negro. Ni siquiera los núcleos atómicos podrán resistir tal empuje y la contracción no se detendrá hasta que la estrella tenga un tamaño infinitesimal, una singularidad donde la intensidad de la gravedad sea infinita.

La oscuridad más absoluta

En 1916 el matemático neozelandés Roy Kerr estudió las propiedades de los agujeros negros en rotación. En 1967 el físico estadounidense John Wheeler acuñó el nombre «agujero negro», llamado así porque ni siquiera los fotones constituyentes de la luz pueden escapar de él. A principios de la década de 1970, Stephen Hawking y otros físicos empezaron a estudiar en profundidad las leyes que rigen los agujeros negros.

Uno en cada galaxia

Los astrónomos han encontrado evidencias de muchos agujeros negros en el universo. En el centro de nuestra galaxia existe uno muy masivo, como cuatro millones de soles. Es posible que exista uno en el centro de cada galaxia del universo, muchos millones de veces más masivo que el Sol. El más grande que se ha medido tiene 17 billones de masas solares y se encuentra en el centro de la galaxia NGC1277, a 250 millones de años-luz de la Tierra. El modelo estándar de los cuásares supone que en su interior existe un agujero negro y se estima que los cuásares (Kammá-ray Burst, objetos estelares emisores de rayos gamma) son agujeros negros en proceso de formación.

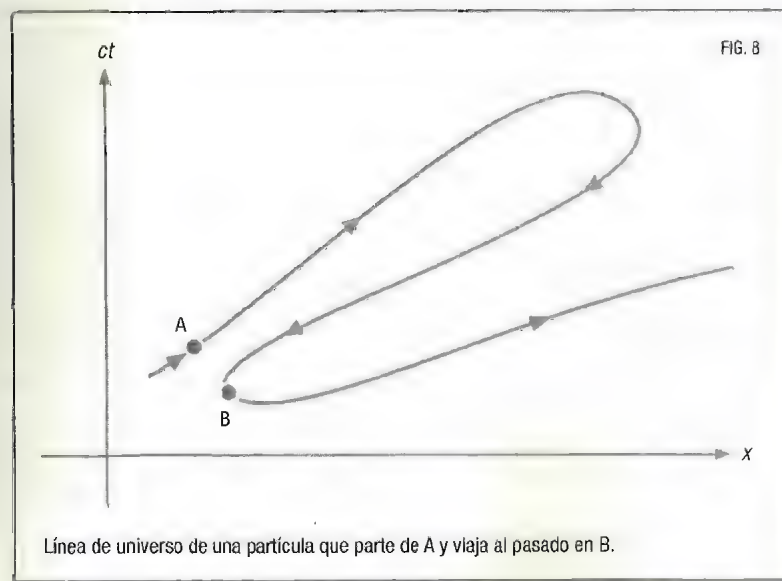


Arriba, representación artística de un agujero negro. Abajo, fuente de rayos X cuyo origen es un agujero negro masivo en el centro de la Vía Láctea.

alugo en cierto punto del espacio-tiempo para volver cerca del punto de partida (figura 8). Esta es la línea de universo de una partícula que se visita a sí misma en el pasado. Cabe resaltar que la partícula no se cruza consigo misma, de hecho ni siquiera se llega a tocar. Esto significaría algo más que una simple visita, ya que las dos partículas ocuparían el mismo punto del espacio, lo que podría ser catastrófico. Aunque una vez que la partícula viaja desde el punto A hasta el B, situado en el pasado de A, nada se opone a que viaje de nuevo al punto de origen, lo que generaría una línea de universo cerrada.

La dirección de las flechas en la línea de universo apunta siempre en la dirección del futuro local de la partícula. Si es un ser humano, su memoria evoluciona en el sentido de las flechas. El viajero situado en el punto B tiene más memoria que la que tenía cuando estaba en A, aunque ambos sean puntos casi idénticos en el espacio-tiempo.

Existen varios problemas con esta curva. En primer lugar, es imposible dibujar una línea de universo cerrada sin que la curva se incline más de 45° con respecto a la vertical. Y, en un espa-



cio-tiempo plano, una inclinación mayor de 45° significa que la partícula llega a superar la velocidad de la luz. Pero esto no es posible. Ya hemos visto que una partícula con masa necesita una energía infinita para acelerar hasta la velocidad de la luz. Por tanto, las trayectorias de las partículas materiales están limitadas a moverse siempre en el sentido en que el tiempo crece sin desviarse más de 45° de la vertical.

En definitiva, el viaje al pasado requiere la existencia de curvas temporales cerradas. Aquí, el adjetivo «temporal» denomina a esas curvas que, al ser divididas en pequeños segmentos de recta, producen intervalos positivos. Esto es equivalente a afirmar que esa curva no superará en ningún momento la velocidad de la luz. Por esa razón, una curva temporal cerrada es sinónimo de una máquina del tiempo. Pero para que sea cerrada, es indispensable que el espacio-tiempo sea curvo y no plano.

PASADO, FUTURO Y CAUSALIDAD

Representemos nuestro presente (aquí-ahora) como un punto en el espacio-tiempo. Enviemos rayos de luz en todas direcciones (figura 9). Las líneas de universo de esos rayos de luz para tiempos positivos son líneas rectas inclinadas 45° que forman un cono invertido que se extiende hasta el infinito.

El interior de este cono se denomina *cono de luz futuro*. Nuestra línea de universo nunca podrá cruzarlo, ya que eso significaría moverse más rápido que la luz. Por tanto, la región dentro del cono de luz futuro contiene todas nuestras posibles posiciones futuras.

Si extendemos el cono de luz hacia tiempos negativos obtenemos el *cono de luz pasado*. El cono de luz pasado contiene todas nuestras posibles posiciones en el pasado. Nuestra línea de universo tampoco podrá cruzarlo jamás, ya que eso significaría que en algún momento en el pasado nos desplazamos más rápido que la luz.

Podemos dibujar una línea recta desde el punto aquí-ahora hasta cualquier punto dentro del cono de luz futuro con una in-

clinación vertical menor de 45° , lo que significa que una partícula puede viajar del aquí-ahora hasta otro punto del futuro a menor velocidad que la luz. Similarmente, cualquier partícula comenzando desde un punto del cono de luz pasado podría haber alcanzado el aquí-ahora viajando a menor velocidad que la luz. Dichas líneas inclinadas menos de 45° son, por tanto, líneas *temporales*. Por el contrario, las líneas inclinadas más de 45° se llaman *líneas espaciales* y son imposibles.

Hay evidencia experimental a favor de la conjetura, ya que no hemos sido invadidos por turistas del futuro.

STEPHEN HAWKING

Si un suceso del pasado puede afectar a otro evento en el futuro se dice que ambos están conectados causalmente. El *principio de causalidad* establece que lo que sucede en el centro del cono de luz (el aquí-ahora) solo puede afectar a lo que sucederá en el cono de luz futuro y solo

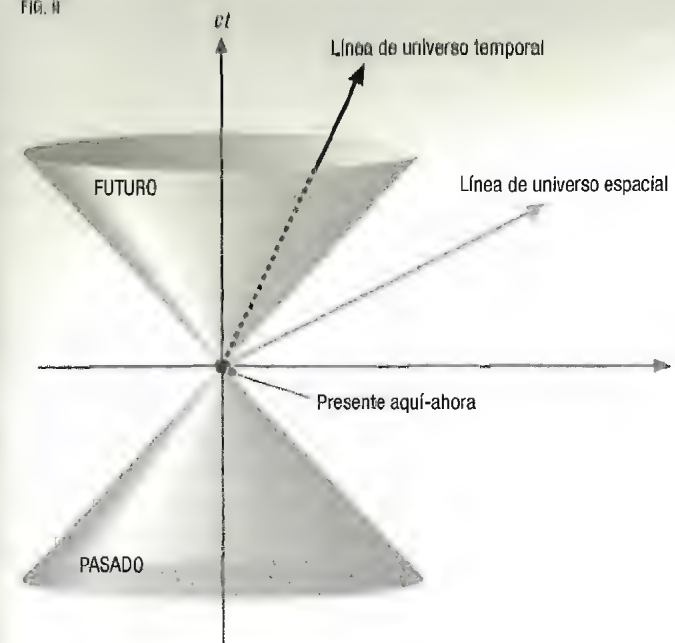
puede verse afectado por lo que sucedió en el cono de luz pasado. Se trata del principio causa-efecto, que nos permite establecer una flecha del tiempo cuya dirección es tal que la causa siempre precede al efecto. La flecha causal del tiempo apunta desde un evento hacia su cono de luz futuro.

Cada punto del espacio-tiempo tiene su propio cono de luz. En el espacio-tiempo plano todos los conos de luz están alineados de forma que sus ejes centrales son paralelos entre sí. En la figura 10 podemos ver tres de estos conos asociados a tres sucesos, A, B y C, que no están conectados causalmente, ya que cada uno está fuera del cono de luz del otro.

En un hiperespacio plano no es posible el viaje al pasado porque el futuro de A siempre está en el cono futuro, y este está completamente separado del cono pasado. La flecha del tiempo de A siempre apunta hacia el futuro y nunca podrá invertirse.

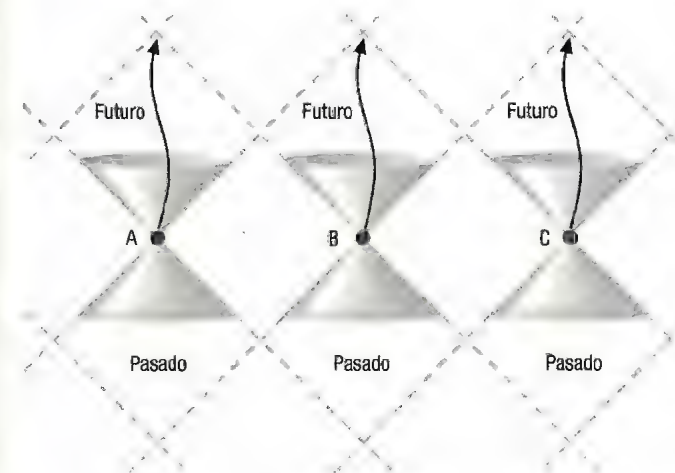
En un espacio-tiempo curvo la orientación de los conos de luz cambia de un punto a otro debido a la gravedad. Esto es debido a que cuando la luz se curva por la gravedad su trayectoria deja de ser una línea recta. Si emitimos rayos de luz en todas direcciones, sus trayectorias ya no forman un cono perfecto en el espacio-tiempo, sino que este se va distorsionando a medida

FIG. 9



Conos de luz pasado y futuro. Una partícula situada en el presente puede seguir una línea de universo temporal, que se mantiene dentro del cono futuro. La línea de universo espacial, fuera de este cono, no es posible, ya que requiere mayor velocidad que la luz.

FIG. 10



Conos de luz para tres sucesos A, B y C en el espacio-tiempo plano.

LA MÉTRICA DEL ESPACIO-TIEMPO CURVO

En los últimos tiempos, debido al papel que ha tenido la relatividad general en el desarrollo de la física moderna, para el estudio y medida correcta del espacio-tiempo es necesario tener en cuenta la gravedad y la energía. Desde entonces se ha conocido que siempre existe una relación entre la geometría y la distribución de la masa y la energía. Einstein publicándolos por primera vez en 1915 y los conocemos como Ecuaciones de Campo de Einstein. En 2011 la NASA hizo un gran descubrimiento que corroboró las predicciones de Einstein: el satélite Gravity Probe B evidenció que existe un vórtice en el espacio-tiempo alrededor de la Tierra y su forma coincide con las predicciones realizadas por esta teoría general.

Funciones espaciales

Para un observador con una línea de universo inclinada más de 45° , el intervalo entre dos sucesos próximos es negativo:

$$(ct)^2 = (ct')^2 - x^2 < 0. \quad [1]$$

El tiempo propio en esta ecuación, τ , sería imaginario, lo cual no tiene ningún sentido físico. Pero que sucede lo mismo cuando una partícula gira hacia el pasado en una curva temporal cerrada? Por qué la ecuación [1] no es la forma correcta de calcular el intervalo en un espacio-tiempo curvo, sino la siguiente:

$$(ct)^2 = A(ct')^2 - Bx^2. \quad [2]$$

Los factores multiplicativos, A y B , son las componentes de la métrica, números que nos indican cómo se miden las distancias y los tiempos. La métrica se obtiene resolviendo las ecuaciones de campo de Einstein. Las curvas temporales atraviesan regiones del espacio-tiempo donde las componentes de la métrica cambian para que el intervalo [2] sea positivo en cada segmento de la curva. Por tanto, pueden ser recorridas por un observador con velocidad inferior a la luz.

Lo que sucede en las inmediaciones de un agujero negro

Puesto que el espacio-tiempo tiene cuatro dimensiones, la métrica del universo tiene en realidad cuatro componentes en lugar de dos, que se suelen denotar con el símbolo $g_{\mu\nu}$, denominando «tensor métrico». Debido a la curvatura de la luz y la dilatación del tiempo, estas cuatro componentes de la métrica varían tanto en el espacio como en el tiempo cuando nos movemos en presencia de un campo gravitatorio. Por tanto, es la variación espacio-temporal del tensor métrico la que determina la curvatura. En el espacio vacío lejos de las galaxias el tensor métrico puede considerarse constante, por lo que la curvatura es cero, y el espacio-tiempo, plano. Las componentes de la métrica son responsables de la inclinación de los conos de luz (véase la

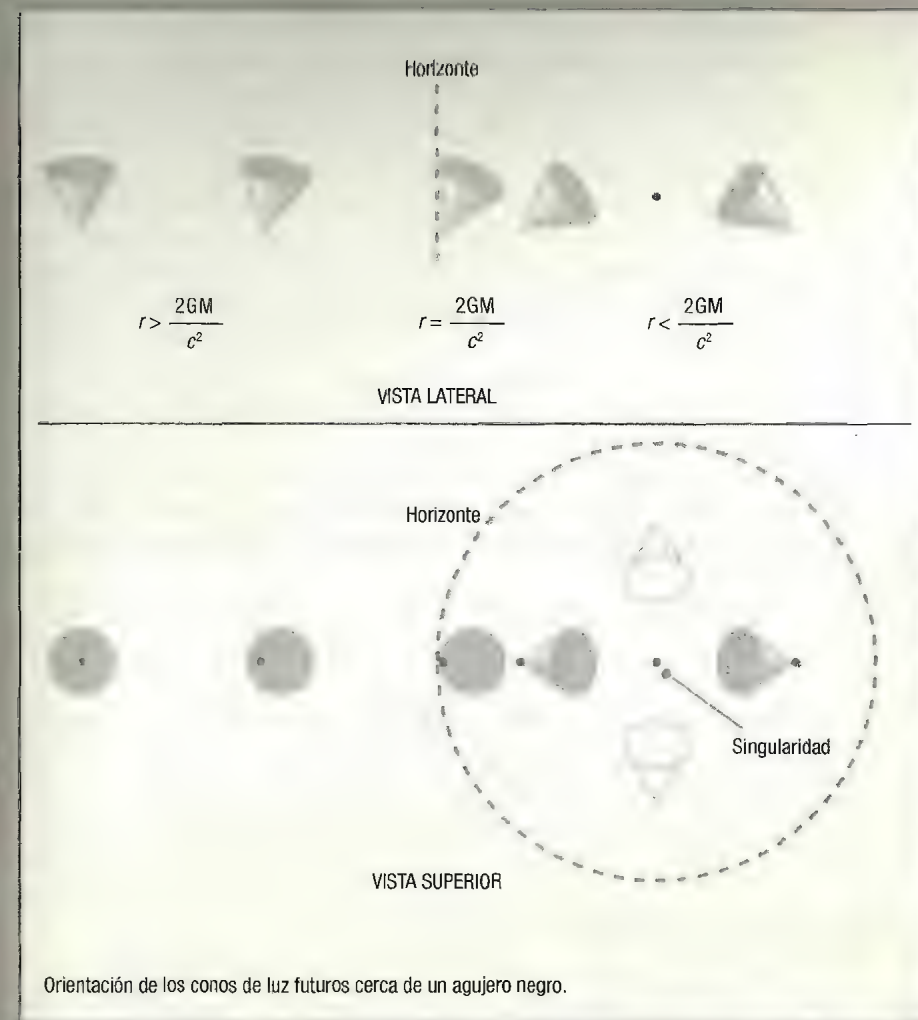
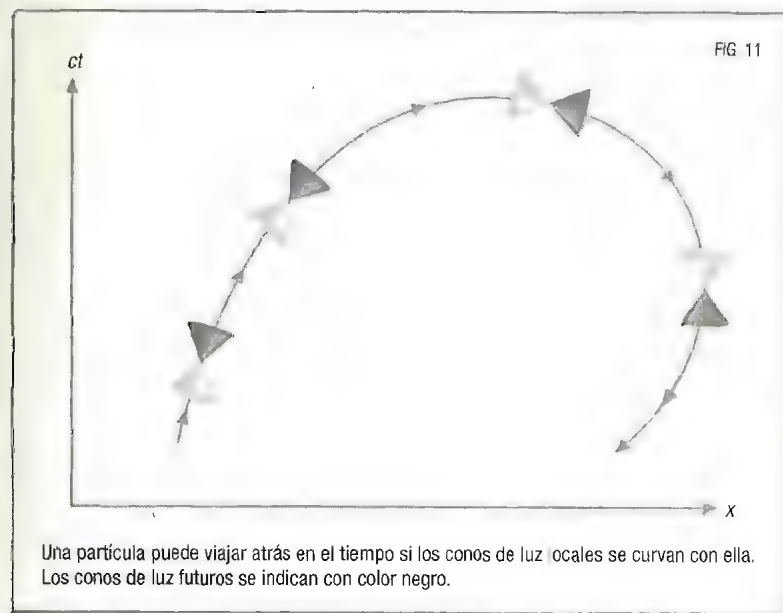


Figura 1. Al acercarnos a un agujero negro los conos de luz futuros se inclinan hacia el horizonte del agujero. A partir del horizonte, los conos de luz apuntan siempre hacia dentro del agujero, de manera que la luz ya no puede escapar. Si nos seguimos introduciendo en su interior, la inclinación se hace más y más acusada hacia la singularidad.

que la luz se aleja de la fuente. Sin embargo, en las cercanías de la fuente de luz, esta se mueve aproximadamente en línea recta y todavía es útil el concepto de «cono de luz». En cada punto del espacio-tiempo podemos dibujar un cono de luz local, que representa la geometría del espacio-tiempo en una pequeña región. Pero al movernos lejos de ella, la orientación del cono de luz cambia debido a la curvatura del espacio-tiempo.

Cabe imaginar entonces que podría ser posible una línea de universo que se curve hacia atrás en el tiempo, manteniendo una velocidad inferior a la de la luz, siempre que los conos de luz locales se inclinen con ella, como se muestra en la figura 11. Esto solo es posible en un espacio-tiempo curvo. Puesto que la línea de universo se mantiene en cada punto dentro del cono de luz futuro, la partícula obedece localmente las leyes de la relatividad especial, viajando a una velocidad inferior a la de la luz.

Aunque desde el punto de vista del observador en reposo la partícula se mueve hacia atrás en el tiempo, desde el punto de vista de la partícula, el tiempo transcurre hacia delante, según su



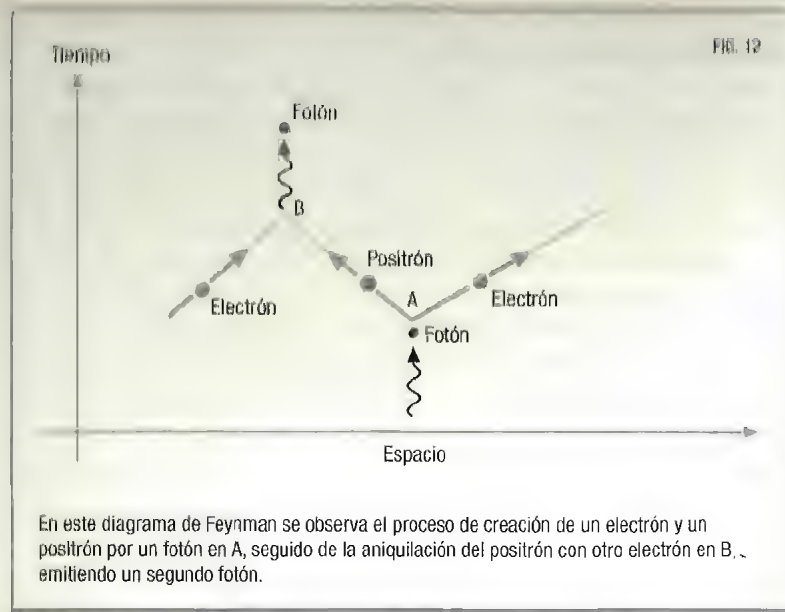
flecha del tiempo local. Esta se mueve siempre hacia su futuro, es decir, hacia su cono de luz.

El primer problema fundamental que hay que resolver para construir una máquina del tiempo consiste, por tanto, en encontrar o diseñar distribuciones de materia o de energía que admitan curvas temporales cerradas que sean soluciones de las ecuaciones de Einstein. Como veremos, desde los inicios de la relatividad general se han encontrado algunas soluciones. El estudio de las curvas temporales cerradas es el estudio de las máquinas del tiempo. Es un problema teórico interesante en sí mismo, porque nos ayuda a entender la geometría del espacio-tiempo y el principio de causalidad. Además, nos permite investigar si el viaje en el tiempo es posible en la práctica, si es que el ser humano puede llegar a desarrollar la formidable tecnología necesaria para realizarlo.

ANTIMATERIA Y VIAJE AL PASADO

En un universo plano, las líneas de universo hacia atrás en el tiempo son posibles en el mundo de las partículas elementales. En 1949 el físico estadounidense Richard Feynman (1918-1988), ganador del premio Nobel de Física en 1965, sugirió que un positrón es en realidad un electrón que se mueve hacia atrás en el tiempo. Un positrón es idéntico a un electrón, excepto que tiene una carga eléctrica igual pero de signo opuesto. La carga del electrón es negativa, mientras que la del positrón es positiva. El positrón es la antipartícula del electrón.

Imaginemos un diagrama de Feynman, que representa una de las contribuciones cuánticas al choque entre un fotón y un electrón (figura 12). El fotón produce en el punto A un par electrón-positrón, que se alejan en direcciones opuestas. El positrón pronto se encuentra con un segundo electrón en el punto B y ambos se aniquilan, emitiendo un fotón. En este diagrama hay dos electrones y un positrón, que aparecen o desaparecen, cada una con su propia línea de universo. Tres líneas de universo conectadas entre sí formando una línea quebrada.



Existe otra manera de interpretar este diagrama de Feynman como la línea de universo de un único electrón que se mueve hacia atrás en el tiempo desde B hasta A. Un positrón que se desplaza hacia delante en el tiempo es matemáticamente equivalente a un electrón que lo hace hacia atrás. Las leyes de la física cuántica son exactamente las mismas en ambas situaciones (un caso particular del teorema de invariancia CPT, es decir, invariancia por conjugación de carga, paridad e inversión temporal). El cambio de carga del electrón en B es causado por la inversión de la dirección temporal.

La causa de que el electrón comience repentinamente a viajar hacia atrás en el tiempo es una fluctuación cuántica, asociada al principio de incertidumbre de Heisenberg. La fluctuación consiste en la emisión de un fotón en el punto B, y la inversión temporal del electrón.

De igual forma, la absorción del fotón en el punto A por el electrón que viene del futuro induce otra fluctuación cuántica. Pero, esta vez, el electrón retrocede hacia delante en el tiempo,

creando la línea de universo del segundo electrón. Feynman explicaba:

Es como si volando en un bombardero sobre una carretera viéramos repentinamente tres carreteras distintas. Solo cuando dos de ellas se juntan y desaparecen de nuevo nos damos cuenta de que, en realidad, hemos pasado sobre una larga curva en zig-zag en una única carretera.

La interpretación de la antimateria como materia viajando hacia atrás en el tiempo es correcta y compatible con las observaciones de las partículas elementales. Rutinariamente se realizan experimentos con antimateria en aceleradores de partículas, es decir, se envían partículas de materia al pasado. Pero no es concebible que el principio de la figura 12 pueda aplicarse para construir una máquina del tiempo de antimateria que funcione a nivel macroscópico.

Los átomos de nuestro cuerpo están hechos de partículas de materia, electrones, protones y neutrones. Para enviar un objeto al pasado con una máquina del tiempo de antimateria tendríamos que inducir una fluctuación cuántica simultánea para que todas las partículas que forman los átomos del objeto emitieran un fotón y se transformaran en antipartículas al mismo tiempo. Estas antipartículas viajarían hacia atrás en el tiempo hasta que se invirtiera el proceso, absorbiendo cada partícula un fotón que las convertiría en materia de nuevo. Pero esta vez en el pasado.

No existe modo alguno de inducir una fluctuación cuántica parecida de manera simultánea en absolutamente todas las partículas elementales que forman un cuerpo microscópico para transformarlo en antimateria. Tampoco es posible preparar en el pasado un haz de fotones que sea absorbido simultáneamente por todas las partículas de antimateria de un cuerpo macroscópico. En mecánica cuántica, las fluctuaciones producidas por absorción y emisión de fotones se rigen por leyes probabilísticas incontrolables, de manera que la máquina del tiempo de antimateria no funcionaría.

Máquinas del tiempo

Las ecuaciones de Einstein admiten la posibilidad de que un viajero se mueva en un circuito cerrado en el espacio-tiempo, siempre que vuelva al mismo lugar y al mismo tiempo en que comenzó el viaje. Aunque nadie ha construido aún una máquina del tiempo, muchos físicos y matemáticos han ideado ya diferentes y extrañas formas teóricas para hacerlo.

El matemático Kurt Gödel (1906-1978) fue uno de los primeros en demostrar que, según la relatividad general, viajar al pasado es posible. Gödel fue uno de los grandes matemáticos del siglo xx. Nacido en Brno (Checoslovaquia), pero de origen alemán, vivió en Viena hasta que en 1939, sintiéndose en riesgo por el régimen nazi, huyó con su mujer a Estados Unidos, donde ocupó un puesto en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, donde trabajaba también Albert Einstein.

En 1949 Gödel publicó un artículo en el número de julio de *Reviews of Modern Physics*, una revista especializada de física. Llevaba por título *Un ejemplo de un nuevo tipo de soluciones cosmológicas de las ecuaciones de campo de la gravitación de Einstein*. En él, Gödel consideró un universo infinito en rotación. En apenas cuatro páginas describía su nueva solución y demostraba matemáticamente que satisfacía las ecuaciones de campo, así como sus propiedades geométricas. En resumidas cuentas, representaba un universo hipotético donde existían líneas temporales cerradas y en el que, por tanto, era posible el viaje al pasado.

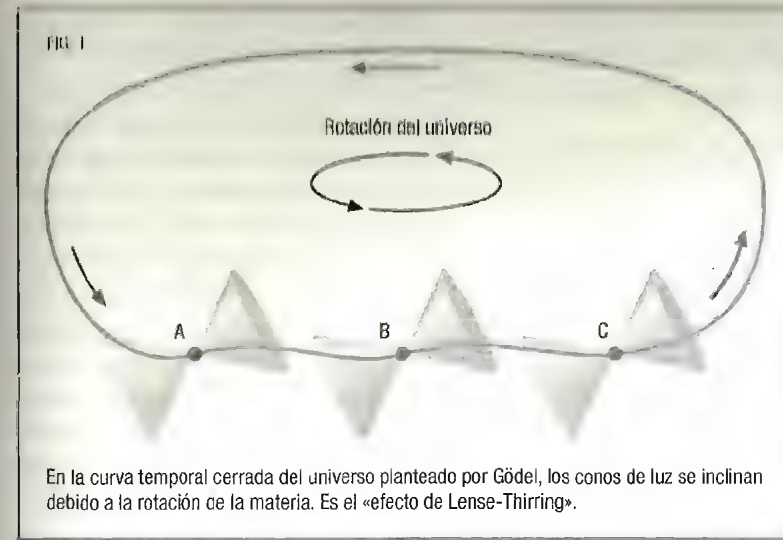
La solución de Gödel suponía el universo como un todo en perpetua rotación. Pretendía resolver así uno de los problemas

de los modelos de universos finitos, en los cuales un universo con bordes tiene tendencia al colapso debido a la atracción gravitatoria entre estrellas y galaxias. En cambio, en el universo de Gödel se evitaba el colapso gravitatorio debido a que la fuerza centrífuga tendía a contrarrestar la atracción gravitatoria, algo parecido a lo que hace que un satélite que gira en su órbita no caiga contra la Tierra.

Los modelos de universos en rotación ya habían sido estudiados en 1924 por el físico húngaro Cornelius Lanczos (1893-1974), pero fue Gödel quien descubrió las propiedades del viaje temporal. Demostró, entre otras cosas, que en «su» universo un círculo de radio suficientemente grande sería una línea temporal cerrada, lo que implicaría viajar hacia atrás en el tiempo. Las ecuaciones de la relatividad general dejaban claro que ese modelo podía existir sin contradecir ninguna ley de la física. Cuanto más rápido rotara el universo, más pequeñas serían las curvas temporales cerradas.

La rotación de la materia causa una distorsión en el espacio-tiempo que inclina los conos de luz. Si imaginamos un punto del universo alrededor del cual tiene lugar la rotación, entonces la inclinación de los conos de luz aumenta al alejarnos de ese punto. Los físicos alemanes Josef Lense y Hans Thirring descubrieron en 1918 que las masas en rotación inclinan los conos de luz, lo que se conoce con el nombre de «efecto de Lense-Thirring» o «efecto de arrastre de sistemas inerciales». Este fenómeno ha sido observado alrededor de agujeros negros y de estrellas de neutrones en rotación.

El arrastre de los sistemas de referencia y la inclinación de los conos de luz son cruciales para el espacio-tiempo de Gödel. A partir de cierta distancia crítica del centro de rotación, el cono de luz futuro de un punto del espacio-tiempo se inclina hacia el pasado de los conos de luz similarmente inclinados en los puntos vecinos. La figura 1 muestra un conjunto de conos de luz en un universo en rotación. Puesto que estos están inclinados, un viajero del tiempo puede seguir un camino circular que comience en A, en dirección hacia su cono de luz futuro, y que lo lleve al cono de luz pasado de A. El camino debe tener un radio superior



al valor crítico que hemos mencionado. La línea de universo de este crononauta siempre estará dentro de su cono de luz local, es decir, nunca excederá la velocidad de la luz.

El universo de Gödel debería rotar lo suficientemente rápido como para contrarrestar la tendencia al colapso gravitacional. Si nuestro universo fuera gödeliano, rotaría una vez cada 70 billones de años. La órbita circular tendría una longitud mínima de 100 billones de años-luz (figura 1). Para que una persona pudiera realizar ese viaje en un tiempo razonable, necesitaría una nave espacial que se moviera a una velocidad cercana a la de la luz. La ingeniería necesaria sería formidable y, por ahora, no está al alcance de nuestras posibilidades tecnológicas.

Gödel era consciente del aspecto paradójico que implicaba la posibilidad del viaje en el tiempo. Si alguien viajara al pasado próximo de aquellos lugares donde había vivido, podría encontrarse a sí mismo en un periodo anterior de su vida. Entonces, le sería posible hacer cosas a esa persona que él sabe que nunca le ocurrieron, lo que violaría el principio causa-efecto. Como en la paradoja del abuelo, el crononauta que parte de A podría viajar a su pasado y matar a su abuelo antes de que él naciera.

Es teóricamente posible en estos mundos rotatorios viajar al pasado, o de otra manera, influir en él.

KURT GÖDEL EN SU ARTÍCULO DE 1949
EN *REVIEW OF MODERN PHYSICS*

Gödel trató de evitar las críticas que apuntaban ese resultado del viaje en el tiempo como una prueba de que su modelo de universo en rotación era defectuoso. Argumentó que la imposibilidad práctica de realizar ese viaje al pasado eliminaba la posibilidad misma de la paradoja. Pero el argumento de Gödel era poco convincente, porque no era un argumento físico, sino que se basaba en las limitaciones de la ingeniería. No ofrecía una solución definitiva a la paradoja, ya que la imposibilidad práctica de recorrer la curva temporal cerrada solo explica por qué estos efectos no se observan normalmente, pero no impide categóricamente que puedan observarse algún día si hubiera la tecnología necesaria. Además, sería posible utilizar señales de radio, viajando a la velocidad de la luz en una curva temporal cerrada, para enviar mensajes al pasado.

En respuesta al artículo de Gödel, el propio Einstein escribió en 1949 lo siguiente:

El ensayo de Kurt Gödel constituye, en mi opinión, una importante contribución a la teoría de la relatividad, especialmente al análisis del concepto de tiempo. El problema aquí discutido ya me preocupó al construir la teoría general de la relatividad, sin haber podido clarificarlo. La distinción antes-después pierde sentido para puntos del espacio-tiempo que están muy alejados en sentido cosmológico, y surgen las paradojas de las que ha hablado Mr. Gödel, que involucran la dirección de la conexión causal. Será interesante sopesar si estas no deben excluirse en base a principios físicos.

Las líneas temporales en el universo de Gödel están presentes desde los inicios del espacio-tiempo. Por ello, se dice que el universo de Gödel es una máquina del tiempo débil. A partir de ese año, el matemático mostró un vivo interés en cualquier observación astronómica que pudiera apoyar la tesis de que nuestro universo está rotando. Pero la observación de las galaxias distantes

nos indica que no lo hace como se supone que rota el universo de Gödel. El nuestro no es un universo gödeliano y, por tanto, no tenemos a nuestra disposición senderos naturales que puedan conducirnos hacia atrás en el tiempo.

A pesar de todo ello, su modelo contribuyó a impulsar la idea de usar los efectos de la relatividad general con grandes objetos en rotación para producir caminos en el espacio-tiempo que posibilitaran viajar al pasado. Después de la propuesta por Gödel se descubrieron nuevas soluciones que permitían esos viajes en el tiempo. Muchas de ellas parecían indicar que la formulación de situaciones compatibles con la relatividad general donde se violara el principio de causalidad era posible. Todo indicaba que el viaje al pasado no era una mera anomalía de la solución particular de Gödel, sino que estaba escrita a fuego en las ecuaciones de campo gravitatorias de la relatividad general.

LOS CILINDROS ROTATORIOS DE TIPLER

Si en un concurso televisivo nos preguntaran quién inventó la máquina del tiempo y cuándo, la respuesta seguramente sería: Frank Tipler en 1974. Este escritor y profesor de física matemática nacido en 1947 en Alabama, Estados Unidos, ideó el cilindro rotatorio de Tipler, un mecanismo para producir artificialmente el efecto de inclinación de los conos de luz, creando curvas temporales cerradas. Es un claro ejemplo de máquina del tiempo fuerte, o lo que es lo mismo, artificial.

El invento de Tipler pertenece a la familia de las máquinas del tiempo cilíndricas, unas estructuras infinitamente largas en forma de cuerdas o cilindros que contienen materia o energía en rotación. En ciertos casos, es posible que, moviéndose a gran velocidad en un camino circular rodeando al cilindro, se pueda volver al punto inicial antes de la partida. Para conseguirlo la velocidad debe ser muy alta, pero siempre inferior a la de la luz. Por tanto, es posible viajar al propio pasado. Durante el trayecto, el tiempo fluirá normalmente para el crononauta (con respecto a su entorno inmediato). Recorriendo un círculo completo, po-

debe encontrarse con una versión más joven de uno mismo en el pasado. En otras palabras, estos cilindros están rodando por curvas temporales cerradas. Si encontráramos uno de estos sistemas, tendríamos a nuestra disposición una máquina del tiempo.

En este artículo supondremos que es posible la creación de una máquina del tiempo.

IGOR NOVIKOV EN *PHYSICAL REVIEW*

Un primer ejemplo fue descrito en 1936 por el físico neerlandés Willem Jacob van Stockum (1910-1944). El

cilindro de Stockum era una larga columna de polvo en rotación cuya densidad y velocidad de rotación eran tales que la columna se mantenía unida por la atracción gravitatoria entre las partículas de polvo.

Cuatro décadas más tarde, Tipler descubrió que, si la velocidad de rotación de la columna de polvo de Van Stockum era suficientemente alta, existirían curvas temporales cerradas a cierta distancia de su centro, que podía ser calculada. Su artículo *Cilindros rotatorios y violación global de la causalidad*, publicado en 1974 en la importante revista especializada *Physical Review D*, sugería por primera vez que un cilindro rotatorio finito actuaría como una máquina del tiempo. Por aquel entonces, Tipler era un físico que estaba realizando su tesis doctoral en la Universidad de Maryland. Su trabajo de investigación versaba sobre la violación de la causalidad en ciertas soluciones de la relatividad general. Dicho de otro modo, estudiaba la teoría del viaje en el tiempo. En su tesis demostró ciertos teoremas relacionados con la posibilidad práctica (o más bien con la imposibilidad) de construir una máquina del tiempo, utilizando su famoso cilindro rotatorio como ejemplo.

Sin embargo, sus resultados más importantes aparecieron en sendos artículos publicados en 1976 y 1977 en las prestigiosas revistas *Physical Review Letters* y *Annals of Physics*, respectivamente. Con gran rigor matemático y usando los últimos avances de la relatividad general, Tipler estudió en profundidad la posibilidad de construir una máquina del tiempo a partir de una cantidad finita de materia ordinaria. Su conclusión era categórica:

El principal propósito de este artículo es responder a la cuestión: «¿Es posible construir una máquina del tiempo?». Si con esto queremos decir: «¿Es posible generar curvas temporales cerradas a partir de datos iniciales regulares en todas partes usando materiales conocidos?», entonces la respuesta es casi con toda certeza: ¡NO!

Para llegar a esta conclusión, Tipler demostró ciertos *teoremas de singularidades* que señalaban que la construcción de una máquina del tiempo provocaría la formación de agujeros negros, en contraposición a los «datos iniciales regulares», es decir, sin singularidades. Para que esto no ocurriera, la máquina debía construirse con un material desconocido de propiedades misteriosas. El autor aclaraba así este requerimiento:

Las curvas temporales cerradas en general no pueden surgir en regiones finitas a partir de datos iniciales regulares sin que cierta cantidad de materia haya sido sometida a condiciones tan extremas que no podamos confiar en nuestro conocimiento sobre el comportamiento del material resultante.

Las condiciones extremas a que Tipler se refería eran necesarias para que se violara la denominada *condición de energía débil*, que significa que la densidad de materia o energía (masa por unidad de volumen) es positiva. Todas las formas de materia y energía conocidas en física clásica obedecen esa condición. Un material que la viole debe tener una densidad de energía negativa o una masa negativa. Este material genera un efecto gravitacional repulsivo sobre la materia ordinaria, y se le conoce actualmente con el nombre de *materia exótica*, desconocida y con propiedades antigravitatorias. Más adelante veremos si las leyes de la física permiten la existencia de esa materia tan rara y, en caso afirmativo, si sería posible manipularla para construir una máquina del tiempo.

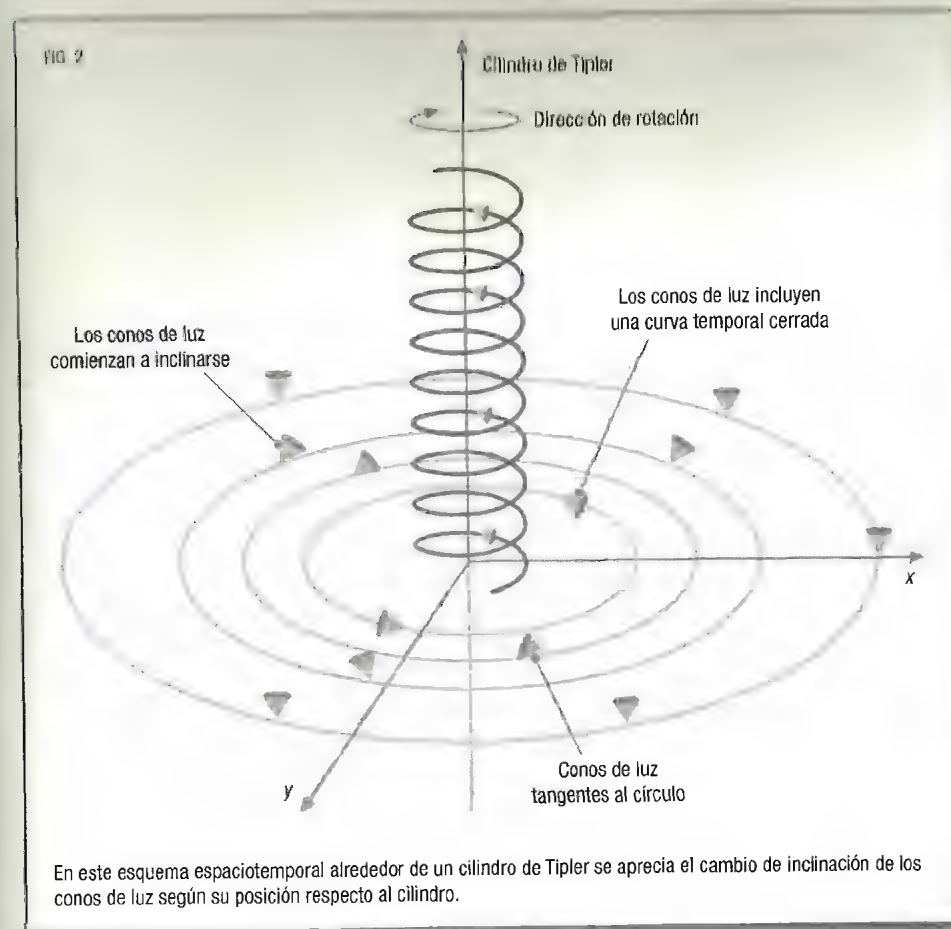
En definitiva, el teorema de Tipler no afirma que sea imposible construir una máquina del tiempo, sino que delimita las condiciones físicas que deben cumplirse para su existencia, esta-

bleciendo requisitos estrictos para su construcción. Podríamos simplificar el teorema de Tipler enunciándolo de la siguiente forma: «No es posible construir una máquina del tiempo finita, sin singularidades y con materia normal».

Si nos olvidamos de las enormes, o quizá insalvables, dificultades de su construcción, nada impide que el cilindro de Tipler funcione, ya se trate de una máquina del tiempo finita o infinita. Tipler explicaba su funcionamiento en la disertación de su tesis doctoral usando un diagrama como el de la figura 2. El cilindro está representado por un eje central vertical perpendicular al plano formado por los ejes x e y . En la figura, este eje se ha sustituido por el eje del tiempo visto por un observador alejado del cilindro. Muy lejos de este, los conos de luz están orientados hacia arriba como corresponde al espacio-tiempo plano de la relatividad especial. Pero si nos acercamos al cilindro, los conos de luz se inclinan. El cono futuro se abre hacia la dirección de rotación (en la figura solo se muestran los conos de luz futuros). La dirección de rotación, que lejos del cilindro mide el espacio, cerca de él mide el tiempo. Así que la máquina del tiempo produce en realidad una transposición de direcciones, como si el espacio se intercambiara por el tiempo.

Para viajar al pasado, el crononauta abandonaría la Tierra a bordo de su nave y se acercaría al cilindro hasta llegar a la región distorsionada del espacio-tiempo. Giraría entonces dando vueltas y vueltas alrededor del cilindro en la dirección de su rotación y su línea de universo resultaría ser una espiral a lo largo de la dirección *negativa* del tiempo, desde el punto de vista de un observador en la Tierra. Es decir, estaría viajando al pasado de nuestro planeta. Sin embargo, el tiempo para el crononauta transcurre normalmente y siempre se mueve hacia su propio futuro. Finalmente, el viajero abandonaría su órbita alrededor del cilindro y volvería a la Tierra en el instante deseado del pasado.

La máquina del tiempo de Tipler es obviamente utópica. Por muy avanzada que fuese, es de suponer que una civilización nunca podría construir una máquina infinita ni dotarla de la infinita energía necesaria para hacerla funcionar, poniéndola en rotación. Sin embargo, imaginemos por un momento que existen seres con



una ingeniería avanzadísima y con los medios a su alcance para intentar construir una máquina *finita* basada en la idea de Tipler.

Para empezar, estos medios deberían ser descomunales. Pertenecerían a una disciplina tecnológica que podríamos llamar «ingeniería interestelar». Tipler calculó la densidad del material, las dimensiones y la velocidad de rotación que requería su cilindro. Una máquina del tiempo de estas características requeriría construir un cilindro de 100 km de longitud, con un radio de 10 km, que tuviera la masa del Sol y que rotara dos veces cada milisegundo.

ESTRELLAS DE NEUTRONES EN ROTACIÓN

Las pulsares son estrellas que emiten ondas de radio en forma de pulsos regulares, de ahí su nombre. Se cree que las pulsares son estrellas de neutrones que están girando a gran velocidad. Estas estrellas emiten ondas electromagnéticas en forma de partículas como las que forman el espectro visible que la estrella gira. En su forma se dice: "la pulso cada vez que la estrella da una vuelta". Si se detecta un pulso cada milisegundo, no indica que la estrella realiza una rotación cada milisegundo.

El momento angular y la rotación

La velocidad de rotación de las estrellas de neutrones se explica por el principio de conservación del momento angular. El momento angular de una partícula de masa m , que está girando alrededor de un eje situado a una distancia r , es igual al producto del momento de inercia, $I = mr^2$, por la velocidad angular de rotación, ω (que expresa el ángulo de rotación por segundo), es decir, $L = I\omega$. El momento angular del momento angular sigue siendo válida para un sistema de muchas partículas que giran al unísono o para un cuerpo extenso, como una estrella en rotación. Solo hay que tener en cuenta que el momento de inercia de un cuerpo se calcula como la suma de los momentos de inercia de todas las partículas que lo componen. Con el momento de inercia expresamos la resistencia de un cuerpo a girar. Si ese momento es grande, será muy difícil poner a un cuerpo en rotación. Si es pequeño, podremos hacerlo girar fácilmente (figura 1). El momento angular de un sistema sobre el que no actúan fuerzas externas se conserva. Este principio es universal, como también lo es la ley de conservación de la energía. Cuando una estrella que está rotando sobre su eje se contrae y colapsa, su radio disminuye y, por tanto, disminuye el momento de inercia. Entonces la velocidad angular debe aumentar para conservar el momento angular.

Cuestión de inercia

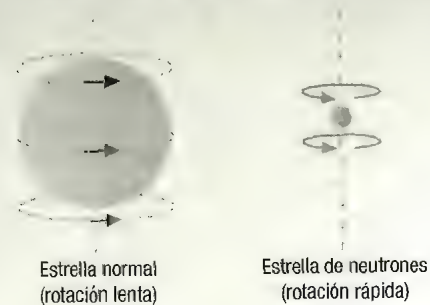
La conservación de momento angular es utilizada por los patinadores en las exhibiciones de patinaje artístico (figura 2). Con los brazos extendidos, la patinadora tiene un momento de inercia I_1 . Entonces comienza a girar con velocidad angular ω_1 . Al bajar los brazos, su momento de inercia disminuye y toma un nuevo valor I_2 . Por tanto, su velocidad de giro, ω_2 , se incrementa para conservar el momento angular. Por esta razón las estrellas de neutrones llegan a girar tan rápido: se forman a partir de

Recreación artística de una estrella de neutrones.



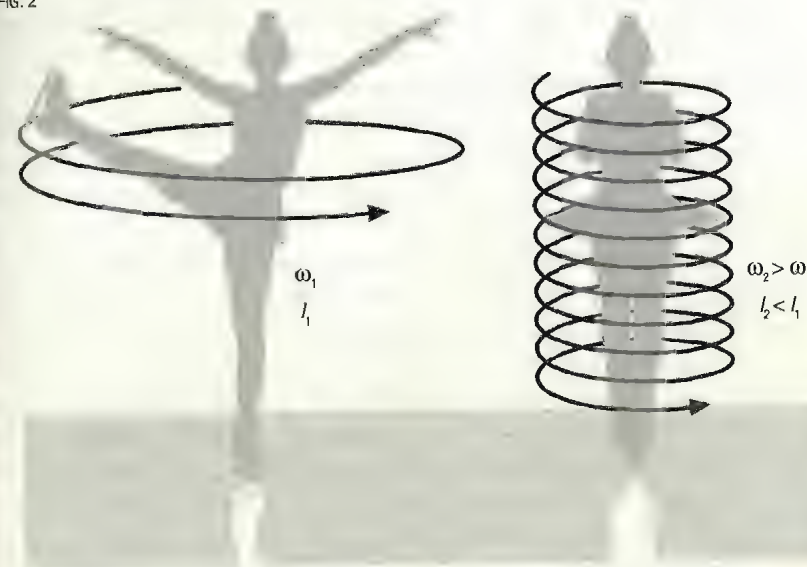
una estrella algo mayor que nuestro sol y que colapsa a un tamaño de unos kilómetros, como resultado de un colapso de una gran estrella. Esto produce una gran reducción de su momento de inercia (quizá un millón de veces más pequeño) y un incremento de su velocidad de rotación en la misma proporción.

FIG. 1



El colapso de una estrella en rotación produce un aumento de su velocidad de giro. Asimismo, cuanto más pequeño es el cuerpo, más fácil resulta el incremento de aceleración de esa rotación.

FIG. 2



Una patinadora puede incrementar su velocidad angular encogiendo las extremidades para disminuir su momento de inercia.

Estas densidades de materia y velocidad de rotación son bastante parecidas a las características de una estrella de neutrones. Existen evidencias de que ciertos objetos estelares, denominados púlsares, son, en efecto, estrellas de neutrones que giran muy rápidamente, una vez por milisegundo. Estos astros serían los candidatos más óptimos para abastecernos de las materias primas necesarias para construir un cilindro de Tipler. Pero necesitaríamos también un cilindro para producir el efecto necesario y las estrellas de neutrones son esféricas. Aquí es donde entraría en juego la pericia de los ingenieros interestelares.

Imaginemos que esa civilización tan avanzada fuera capaz de desplazar una decena de estrellas de neutrones girando a la misma velocidad en la misma dirección y colocarlas, una sobre la otra, para formar un cilindro de Tipler. Entonces se habría construido una máquina del tiempo finita. Pero hay un pequeño problema que los ingenieros deberían haber previsto. El teorema de Tipler afirma que no es posible hacer esto sin singularidades. El cilindro construido a partir de objetos tan masivos no sería estable. La atracción gravitatoria tiraría de toda esa materia para producir una esfera concentrada con la masa de diez estrellas de neutrones que, probablemente, se contraería hasta formar un agujero negro, es decir, la singularidad predicha por el teorema de Tipler.

Por tanto, los ingenieros interestelares empeñados en construir un cilindro de Tipler... ¿tendrían que afrontar retos probablemente insalvables? Para empezar, deberían localizar al menos diez estrellas de neutrones y arrastrarlas a todas a la vez. Las estrellas de neutrones más próximas se encuentran a unos 300 años-luz de la Tierra, por lo que se requeriría la habilidad de viajar larguísimos recorridos y de manipular objetos con la masa de una estrella para trasladarlos a cientos de años-luz de distancia. Luego, habría que unirlos, igualar su rotación y acelerarlos todavía más, hasta lograr dos rotaciones por milisegundo.

Seguidamente, habría que aplicar una fuerza tremenda para mantener las estrellas en su posición formando un cilindro. Esta fuerza debería ser, probablemente, de tipo antigravitatorio para evitar el colapso que formaría un agujero negro. Esto es también

una consecuencia del teorema de Tipler. No es posible construir un agujero negro con materia normal. Para generar las fuerzas antigravitatorias necesitaríamos materia exótica.

Finalmente, suponiendo que nuestros súper ingenieros interestelares hubieran sido capaces de resolver todos estos problemas y de construir un cilindro de Tipler, el crononauta se encontraría ahora con un problema adicional. Las fuerzas de marea producidas por el enorme campo gravitatorio del cilindro destrozarían la nave y a sus ocupantes en cuanto se acercaran a él. De nuevo, se requeriría utilizar materia exótica para proteger la nave. En definitiva, aunque el cilindro de Tipler podría funcionar como máquina del tiempo, requeriría tales medios que con gran probabilidad nunca se construirá ninguno. Al menos ahora no nos lo podemos ni siquiera imaginar.

LAS CUERDAS CÓSMICAS DE GOTT

En 1990 el físico estadounidense Richard Gott encontró una nueva forma de viajar en el tiempo que no requería manipular objetos masivos en rotación, evitando la aparición de agujeros negros y la necesidad de utilizar materia exótica. Gott demostró que era posible recorrer una curva temporal cerrada viajando a gran velocidad alrededor de dos cuerdas cósmicas en movimiento, lo que permitiría al viajero visitar su propio pasado (figura 3).

Las cuerdas cósmicas son largos filamentos de energía pura, increíblemente delgados, que pudieron haberse formado durante la gran explosión o Big Bang que generó nuestro actual universo. La masa de estos objetos sería formidable, teniendo en cuenta que su grosor es menor que el de un núcleo atómico. La Teoría de Gran Unificación (GUT por sus siglas en inglés) de las partículas elementales predice que cada centímetro de una cuerda cósmica pesaría unas 10^{16} toneladas, es decir, unos mil billones de toneladas. Una cuerda cósmica de 60 km de longitud pesaría igual que la Tierra. No es de extrañar que el espacio-tiempo se curve intensamente en las cercanías de una de estas increíbles y megapesadas hebras.

Las cuerdas cósmicas, cuya posible existencia fue sugerida por el físico británico Tom Kibble en 1976, no deben confundirse con las supercuerdas, esos objetos teóricos de grosor nulo que se enrollan formando bucles microscópicos, y que representan a las partículas elementales en la teoría de las supercuerdas. Las cuerdas cósmicas, por el contrario, no poseen extremos. Pueden

El viaje en el tiempo está conectado al viaje más rápido que la luz. Si puedes hacer una cosa, puedes hacer la otra.

STEPHEN HAWKING

logía y astrofísica debido a sus inmensas masas. Además, sus propiedades dependen en gran medida de los detalles de la teoría de las partículas elementales. Su descubrimiento proporcionaría una valiosísima información sobre las propiedades de las partículas elementales a unas energías enormes que no son reproducibles en ningún laboratorio. Lo cierto es que, hasta ahora, no se ha encontrado evidencia de su existencia.

Richard Gott resolvió de forma exacta las ecuaciones de Einstein frente a un escenario donde hay dos cuerdas cósmicas infinitas en movimiento que no se cruzan. Demostró que existían soluciones con curvas temporales cerradas que rodeaban a las dos cuerdas, cuyas configuraciones harían posible una máquina del tiempo. Gott publicó sus resultados en la revista *Physical Review Letters*, con el título: *Curvas temporales cerradas producidas por pares de cuerdas cósmicas en movimiento*.

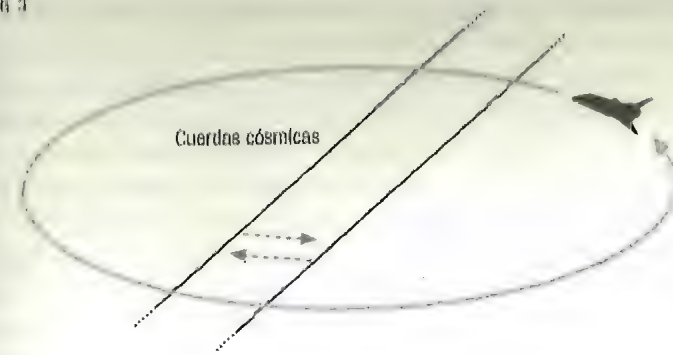
Además, Gott descubrió que la gran concentración de masa de una cuerda cósmica distorsiona el espacio-tiempo de una forma peculiar: genera un notable estrechamiento del espacio en sus proximidades. Una característica que, como veremos a continuación, es la que permite el viaje en el tiempo.

Observemos la distorsión del espacio-tiempo por una cuerda cósmica (figura 4). La cuerda está situada en el punto con coordenadas $(0, d)$. La curvatura de este plano es equivalente

tener longitud infinita o formar bucles cerrados. Son tan masivas que solo se pudieron crear en un universo primitivo, donde existieron partículas de muy alta energía únicamente durante un tiempo muy corto tras el Big Bang.

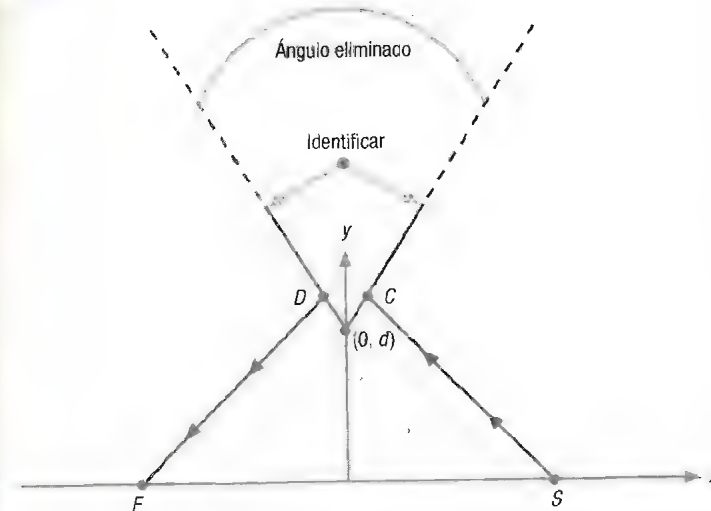
Si las cuerdas cósmicas existen, serían de gran importancia en cosmo-

FIG. 3



La máquina del tiempo de Gott utiliza dos cuerdas cósmicas en movimiento que se rodean a gran velocidad en una curva cerrada.

FIG. 4



Distorsión del espacio tiempo alrededor de una cuerda cósmica. La cuerda es perpendicular al plano de la figura y está situada en el punto marcado con coordenadas $(0, d)$.

a eliminar toda la región del espacio comprendida dentro del ángulo superior e identificar las dos rectas que la delimitan. Imaginemos que la figura 4 es un recortable. Tras recortar la región delimitada por las dos rectas superiores, pegamos con cola los dos bordes uniendo el punto C con el punto D. La superficie

Una máquina del tiempo para visitar el pasado no es algo que podríamos construir en nuestro propio garaje.

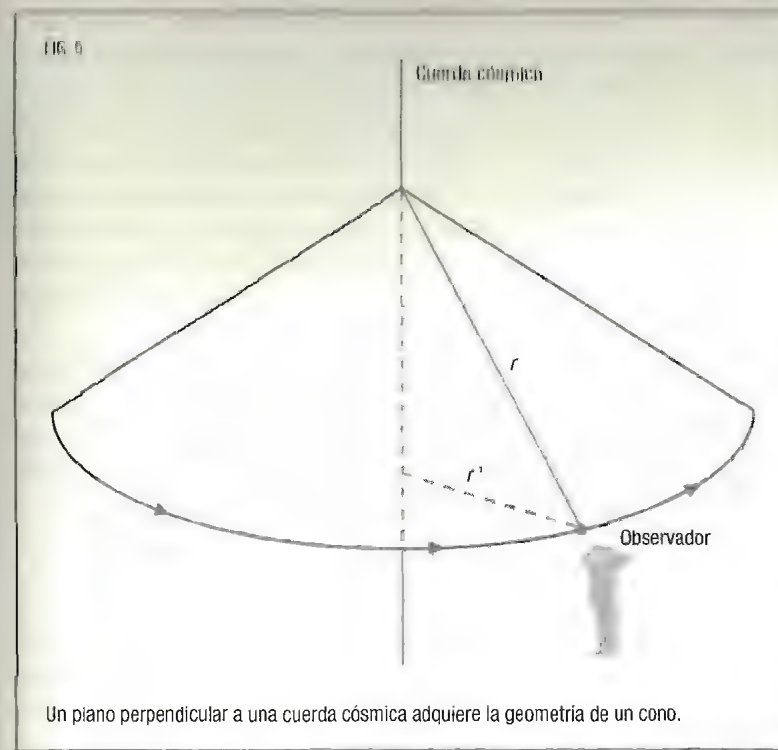
J. RICHARD GOTT EN *LOS VIAJES EN EL TIEMPO*

resultante será un cono (figura 5). Es decir: la cuerda cósmica produce en el espacio-tiempo la misma curvatura que tendría un cono. En la figura tan solo hemos representado un plano perpendicular a la cuerda, pero esta curvatura se produce en todos los planos atravesados por la cuerda.

da, hasta el infinito. Todo el espacio se curva de esta forma. Es como si separáramos una inmensa cuña del espacio-tiempo y juntáramos sus bordes.

El resultado más notable es que, al recorrer un camino circular a una distancia r alrededor de la cuerda, nos ahorramos el trayecto de C a D (figura 4). Al eliminar el ángulo indicado en la figura 4, la longitud de una circunferencia alrededor de la cuerda es más corta que la longitud ordinaria, $L = 2\pi r$, en el universo plano. En definitiva, las longitudes de las curvas que rodean la cuerda se hacen más cortas. Esto nos permite reducir las distancias espaciales mediante un atajo rodeando la cuerda.

Consideremos ahora los dos puntos F y S, situados en el eje x de la figura 4. Supongamos que queremos enviar un rayo de luz de S a F. En el espacio-tiempo normal, sin curvatura, el rayo de luz viajaría por la línea recta que une S y F a lo largo del eje x . Pero en presencia de la cuerda cósmica existe un segundo camino que la luz puede seguir: el camino que va de S a C y luego de D a F. Esto es posible porque los puntos C y D son, en realidad, el mismo punto. Es como si la luz estuviera rodeando el cono de la figura 5. Puede rodearlo viajando en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. Y ahora viene el punto importante: si el ángulo eliminado es lo suficientemente grande, y los puntos F y S están lo suficientemente alejados entre sí, es posible que la distancia que recorre la luz en el segundo camino «indirecto»,



alrededor de la cuerda, sea menor que la distancia entre F y S por el primer camino «directo». El rayo de luz llegará antes de S a F si rodea la cuerda.

Ese camino indirecto permite que una nave espacial que viaja casi a la velocidad de la luz, partiendo de S llegue a F antes que la luz. Para dos observadores en reposo en S y F esto es equivalente a superar la velocidad de la luz. Estamos hablando de distancias cósmicas y grandes velocidades. Si la distancia de S a F fuera de 1000 años-luz y la cuerda estuviera a 500 años-luz de S, viajando al 99,9% de la velocidad de la luz y siguiendo el atajo, nuestra nave podría llegar a F 50 años antes que la luz.

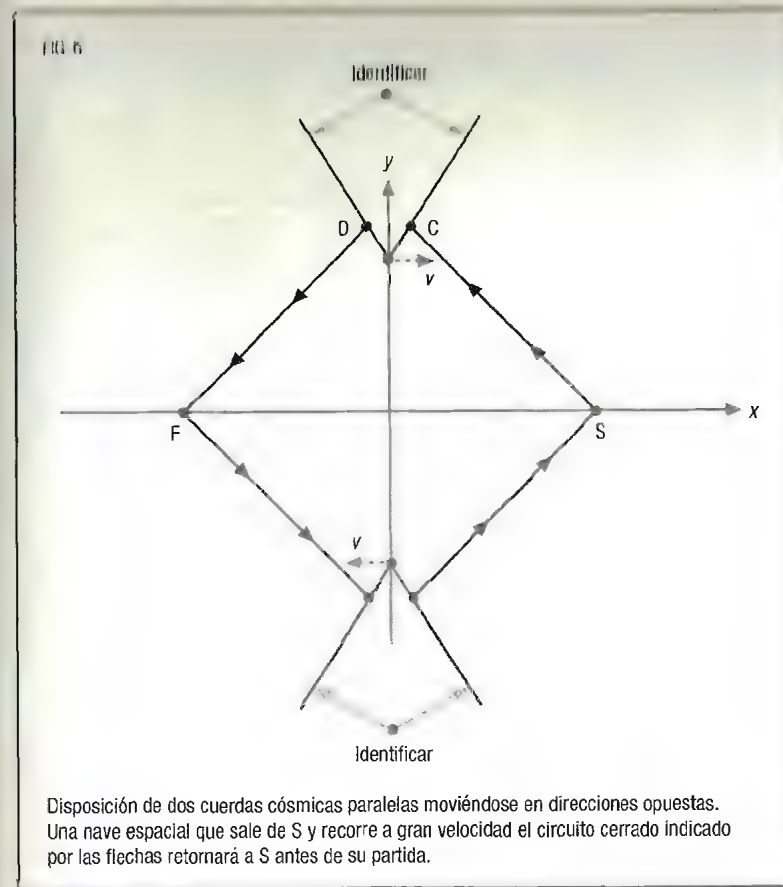
Pero con una única cuerda cósmica no es posible viajar atrás en el tiempo. Si regresamos a S invirtiendo el recorrido, llegaremos al futuro de S después de nuestra partida. Gott se dio cuenta

de que, para recorrer una curva temporal cerrada, se necesita una segunda cuerda paralela a la primera y situada simétricamente en el semiplano inferior (figura 6). Las dos cuerdas deben estar en movimiento relativo. La cuerda superior avanza en sentido positivo paralelamente al eje x y la inferior se mueve en sentido opuesto. Esta disposición de cuerdas es un caso particular de lo que se conoce con el nombre de *anillo de Roman* (por el físico Thomas Roman), una configuración de atajos espaciotemporales en movimiento relativo en la que se basan muchos de los dispositivos ideados para viajar en el tiempo.

A continuación describiremos el viaje en el tiempo según Gott. Su razonamiento utiliza conceptos elementales de relatividad especial, que eventualmente podrían ser difíciles de seguir. Pero cualquier confusión que le surja al lector quedará resuelta en el próximo capítulo, donde explicaremos con más detalle el funcionamiento de los anillos de Roman, usando el concepto pedagógico de las puertas del tiempo.

Vamos a partir de un escenario en el que hay dos sucesos, 1 y 2. El suceso 1 (la nave sale de S) y el suceso 2 (la nave llega a F) están separados por un intervalo de tipo espacial. Según la relatividad espacial, si la cuerda superior se mueve a suficiente velocidad (próxima a la luz) conseguiremos que 1 y 2 sean simultáneos para los observadores en reposo en S y F. Es decir, que la nave llegará a F en el mismo instante en que salió de S. Esto ocurre porque la nave avanza por el plano superior de S a F en sentido contrario al movimiento de la cuerda. En el viaje de retorno de F a S por el camino inferior, la situación es completamente análoga, ya que nos moveremos en sentido opuesto al del avance de la segunda cuerda. Por tanto, la nave sale de F y llega a S en el mismo instante de tiempo. Así pues, la nave salió de S, recorrió el circuito y volvió a S en el mismo instante. El crononauta llegará a tiempo para verse a sí mismo en el momento de su partida. Incluso podría llegar antes de ese momento si aumentara la velocidad de su nave.

El razonamiento anterior se fundamenta en que, a pesar de su gran masa, las dos cuerdas cósmicas no se atraen entre sí. Esto es debido a que las cuerdas están en tensión por una succión



en su interior que produce una presión negativa que compensa exactamente la atracción gravitatoria entre ellas.

Existen ciertas condiciones geométricas para que el circuito alrededor de las cuerdas de Gott sea una curva temporal cerrada. En primer lugar, la distancia entre S y F debe ser mucho mayor que la distancia entre las cuerdas (podríamos estar hablando de miles de años-luz). Aunque fuera posible localizar dos cuerdas cósmicas y acelerarlas, la configuración simétrica de la figura 6 solo permitiría realizar un viaje. Luego, las cuerdas se separarían y habría que recomponer la máquina del tiempo. Por

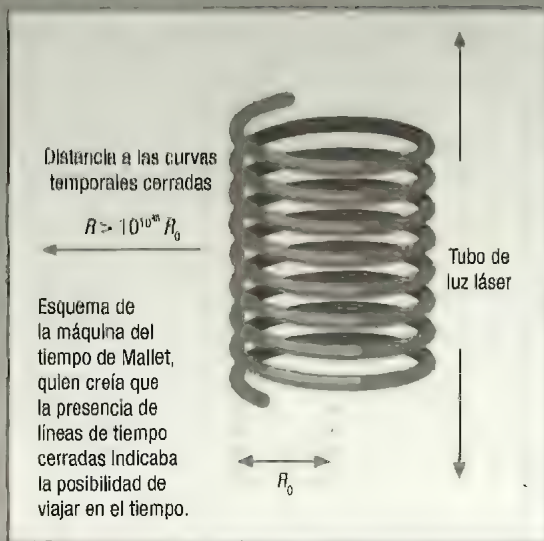
LA IMPOSIBLE MÁQUINA DEL TIEMPO DE MALLETT

Una época de la ciencia ficción que ha dado lugar a una gran variedad de tipos de máquinas del tiempo, desde la más sencilla hasta la más sofisticada. Uno de ellos es la máquina del tiempo de Mallett, propuesta en la década de los años sesenta por el físico israelí Amos Ori. Mallett, que es un físico teórico, ha trabajado en un artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* en 1992. En su libro *El Viaje del tiempo* (2003), Mallett relata su dramática historia de investigación personal y descubrimiento científico en su búsqueda de la máquina del tiempo, inspirado por la novela *La máquina del tiempo* de H.G. Wells y tras perder a su padre a la edad de diez años,

decidió estudiar física y seguir los pasos de Einstein, especializándose en relatividad general. Cuando en el barrio del Bronx de Nueva York, Mallett es famoso por ser uno de los primeros estadounidenses que recibió un doctorado en física teórica en Estados Unidos. Sus teorías sobre la máquina del tiempo han tenido bastante difusión en periódicos como *The Wall Street Journal* y revistas como *Rolling Stone*, y ha aparecido incluso en diversos programas de televisión. Mallett encontró una solución a las ecuaciones de Einstein con curvas temporales cerradas alrededor de un cilindro infinito de luz, consistente en un rayo láser enrollado por una fibra óptica enrollada formando una hélice de radio R , tal como se muestra en la ilustración. En su libro, y en sus diversas apariciones en los medios, Mallett discute la posibilidad de construir una máquina del tiempo a partir de un cilindro de luz de longitud finita que sea lo suficientemente largo.

Evidencias de su inviabilidad

Aunque las soluciones de Mallett son correctas, en la práctica su máquina del tiempo no funciona, como pusieron de manifiesto los físicos Ken D. Olum y Allen Everett. Ambos calcularon el radio R de la trayectoria para viajar en el tiempo en la máquina de Mallett y estimaron que sería superior al radio de la hélice multiplicado por un factor de 10 elevado a la potencia de 10¹⁰, un número inconmensurablemente mayor que el radio del universo. Además, al desconectar el haz láser que hace funcionar su máquina, se crearía una singularidad desnuda, o lo que es lo mismo: Mallett se encontraría con un agujero negro en su laboratorio.



ello los físicos han estudiado la existencia de curvas temporales cerradas con otras disposiciones de cuerdas cósmicas. Esto nos lleva a una importante cuestión: ¿han existido senderos para viajar en el tiempo desde que se creó el universo? El físico israelí Amos Ori demostró que siempre hay curvas temporales cerradas alrededor de las cuerdas cósmicas de Gott. Inicialmente, estas curvas son infinitas y se contraen a medida que las cuerdas se acercan. Quizá una civilización muy avanzada pudiera encontrar los senderos en el tiempo de Gott, pero eso sería una labor tan formidable como alcanzar la velocidad próxima a la luz necesaria para recorrerlos completamente —rodeando el universo— y volver al punto de partida en el pasado.

Las puertas del tiempo

Los agujeros de gusano, también denominados «entradas dimensionales», «portales espaciales» o «atajos en el hiperespacio» son hoy la vía más prometedora para conseguir esa deseada máquina del tiempo, ya que permiten adelantar a un rayo de luz tomando un atajo. ¿El objetivo? Superar la velocidad de la luz, una especie de llave para abrir esa puerta temporal y regresar al pasado.

En la serie de ciencia ficción española *El Ministerio del Tiempo*, una agencia secreta del Gobierno custodiaba las puertas del tiempo y al cruzar el umbral de una de ellas, el viajero era transportado instantáneamente a otra puerta similar, situada en un lugar distinto en el pasado. La misión de los agentes, reclutados en diferentes épocas, era proteger la cronología e impedir que las puertas se utilizaran para modificar la historia. Este argumento es una adaptación moderna de tantas otras historias sobre portales dimensionales, tan recurrentes en la literatura fantástica y de ciencia ficción. Como Alicia, la joven heroína que hizo famoso a Lewis Carroll. Ella fue una de las primeras en atravesar estos portales para viajar, en el espacio y en el tiempo, a otro mundo, a otro universo.

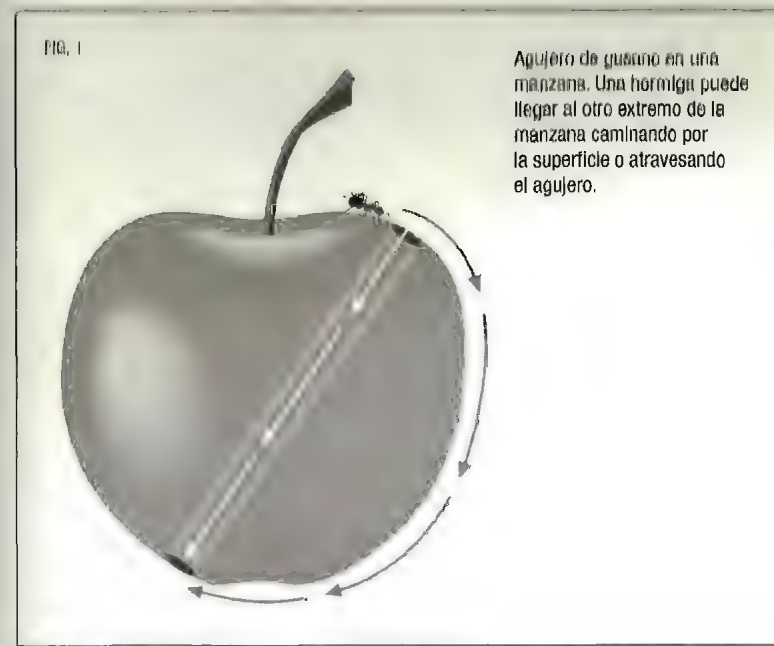
Los adictos a la ciencia ficción ya estaban familiarizados con la noción del hiperespacio, antes de que fuera popularizado definitivamente en la película *Star Wars*. Se trata de un ámbito multidimensional limitado por el espacio-tiempo, a través del cual, en un futuro muy lejano, los viajes interestelares acortarán las —de otro modo insuperables— distancias entre galaxias. La fascinación popular por la cuarta dimensión y los atajos espaciales ha

generado innumerables especulaciones sobre sus posibilidades y aplicaciones, inclusive el viaje en el tiempo. La mala noticia para los entusiastas de este tema es que la gran mayoría de ellas, o no tienen apenas fundamento científico o bien requieren medios tecnológicos inalcanzables, al menos por el momento. Pero hay también una buena noticia: muchos físicos reconocidos opinan que es muy probable que el hiperespacio exista realmente.

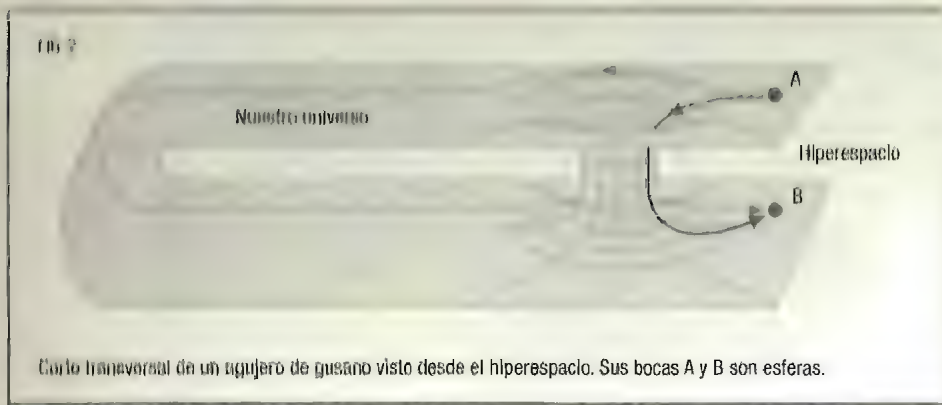
La primera teoría del hiperespacio, denominada teoría de Kaluza-Klein, data de 1919. Fue propuesta por el matemático polaco Theodor Kaluza (1885-1954), quien sugería que el electromagnetismo podía describirse como una serie de vibraciones en la quinta dimensión. En 1926, el matemático suizo Oskar Klein (1894-1977) propuso que esa dimensión extra no era visible porque estaba enrollada en forma de un círculo de 10^{-33} cm, mucho menor que un radio atómico. En 1984, los físicos Michael Green y John Schwarz demostraron la consistencia de la teoría de supercuerdas, que postula que toda la materia consiste en minúsculas cuerdas vibrantes en un espacio-tiempo de diez dimensiones. Experimentalmente, esta teoría no ha sido todavía confirmada, pero los experimentos con potentes aceleradores, como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, podrían permitirnos observar las dimensiones extra, detectando las partículas que, a muy alta energía, fueran capaces de atravesar esas dimensiones.

ESOS MISTERIOSOS AGUJEROS DE GUSANO

El hiperespacio posee muchas e interesantes implicaciones geométricas. Imaginemos, por ejemplo, una colonia de hormigas que vive en una esfera. Para ellas, existen dos formas de viajar de un polo a otro: la forma usual es recorrer la superficie de la esfera, pero si optan por la senda del hiperespacio, atravesarán la esfera por su interior, a lo largo de un diámetro. Si esa esfera es una manzana y el camino del hiperespacio, un túnel a través de la fruta (probablemente realizado por un gusano...), tendríamos el símil de esos atajos del hiperespacio denominados «agujeros de gusano» (figura 1).

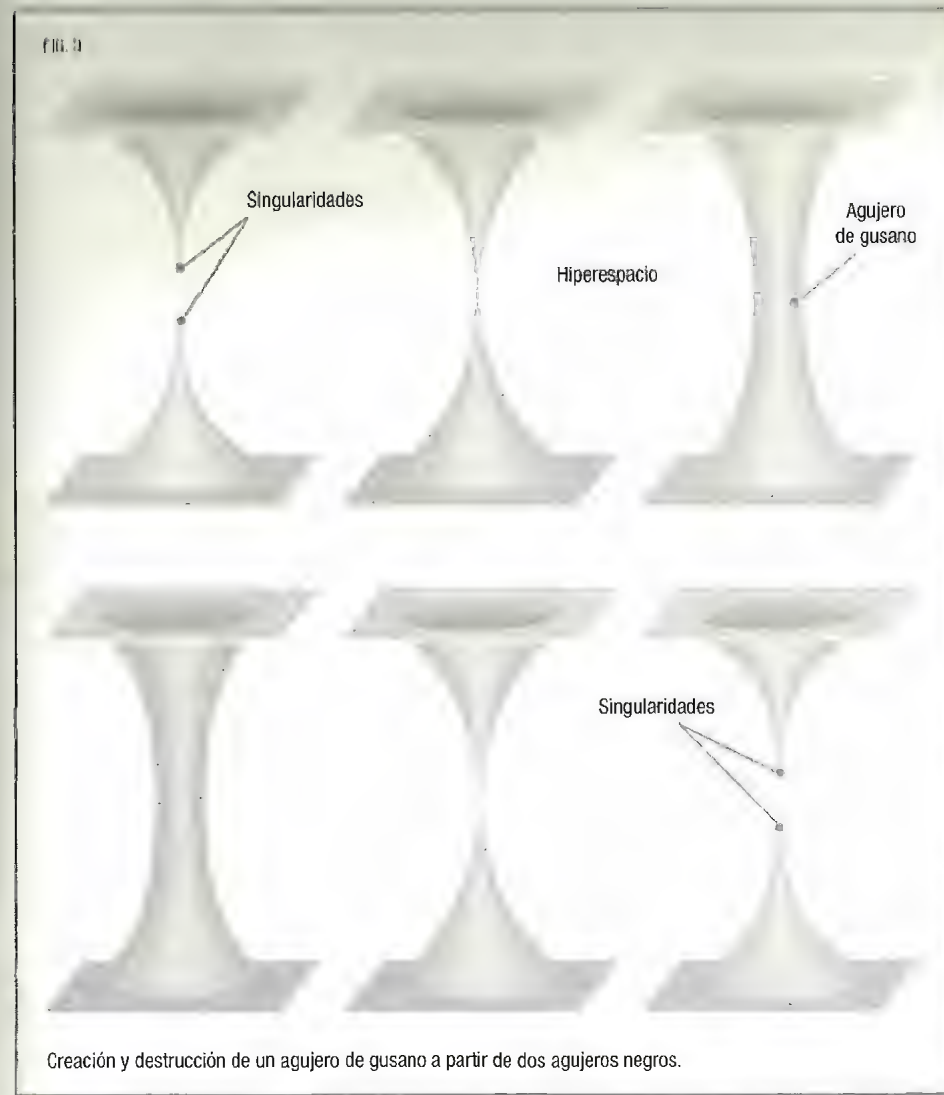


La teoría general de la relatividad predice la existencia de esos agujeros de gusano en el espacio-tiempo. Fueron descubiertos teóricamente por el físico Ludwig Flamm (1885-1964) en Viena en 1916, como una solución de las ecuaciones que Einstein acababa de formular. Años después, en 1935, desconociendo el trabajo de Flamm, Einstein y su alumno Nathan Rosen redescubrieron la idea y estudiaron sus propiedades. Dicha conclusión comenzó a denominarse «puente de Einstein-Rosen». El concepto resurgió de nuevo en los años cincuenta y sesenta del siglo pasado con los trabajos de John Wheeler y sus colaboradores en la Universidad de Princeton. Wheeler fue quien popularizó el término «agujero de gusano». Podemos imaginar dicho agujero haciendo un corte transversal desde el hiperespacio (figura 2). Hemos representado el universo doblado, como si fuera una hoja de papel, para poder conectar los puntos A y B con el agujero de gusano. Este tiene dos entradas, llamadas bocas, conectadas entre sí por el túnel que conforma el agujero de gusano y que dis-

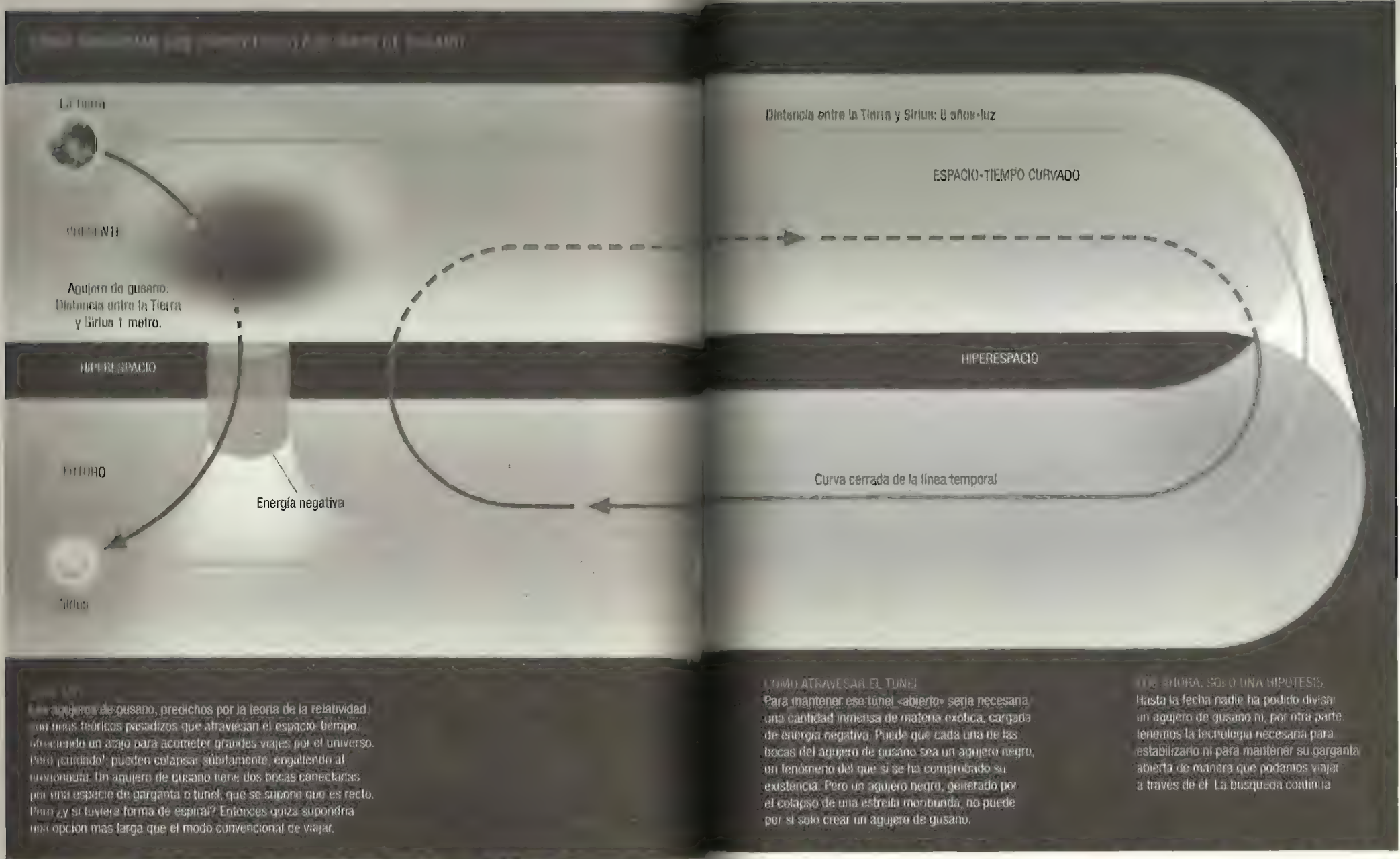


curre a través del hiperespacio. El túnel podría tener menos de un kilómetro de longitud. En este escenario, existen dos caminos para viajar del punto A al punto B: el camino corto, a lo largo de las paredes del agujero de gusano y el camino largo, atravesando el universo. Como nuestro universo en realidad es tridimensional, las bocas del agujero de gusano no son círculos, sino esferas (figura 2, derecha).

Durante años, desde el descubrimiento matemático de los agujeros de gusano como soluciones de las ecuaciones de Einstein, nadie imaginó que pudieran utilizarse para viajar por el hiperespacio. En 1962, Wheeler y su alumno Robert Fuller demostraron que los agujeros de gusano son inestables. El cuello del agujero colapsa tan rápidamente que ni siquiera un rayo de luz tiene tiempo de atravesarlo antes de que desaparezca. Un agujero de gusano se produce a partir de dos singularidades del espacio-tiempo, es decir, dos agujeros negros (figura 3). La curvatura es tan grande que las dos singularidades podrían encontrarse a través del hiperespacio y crear el agujero de gusano. La dinámica de su formación es la siguiente. Primero, se expande como un globo e, inmediatamente, se desinfla y el agujero se contrae hasta que la unión de las singularidades se rompe. Este proceso ocurre tan rápidamente que cualquier cosa que intente atravesarlo quedará atrapada y destruida. Por ello, el interés en los agujeros de gusano como portal dimensional decayó durante dos décadas.



Pero a finales de la década de 1980 la situación cambió radicalmente cuando el físico Kip Thorne, del Instituto Tecnológico de California, junto con sus estudiantes Mike Morris y Ulvi Yurtsever, publicaron varios artículos técnicos sobre agujeros



Los agujeros de gusano, predichos por la teoría de la relatividad, son unos teóricos pasadizos que atraviesan el espacio-tiempo, ofreciendo un atajo para acometer grandes viajes por el universo. Pero ¡cuidado!: pueden colapsar súbitamente, engullendo al viajero. Un agujero de gusano tiene dos bocas conectadas por una especie de garganta o túnel, que se supone que es recto. Pero ¿y si tuviera forma de espiral? Entonces quizá supondría una opción más larga que el modo convencional de viajar.

¿CÓMO ATRAVESAR EL TÚNEL?

Para mantener ese túnel «abierto» sería necesaria una cantidad inmensa de materia exótica, cargada de energía negativa. Puede que cada una de las bocas del agujero de gusano sea un agujero negro, un fenómeno del que sí se ha comprobado su existencia. Pero un agujero negro, generado por el colapso de una estrella moribunda, no puede por sí solo crear un agujero de gusano.

¿DE AHORA, SOLO UNA HIPÓTESIS?

Hasta la fecha nadie ha podido divisar un agujero de gusano ni, por otra parte, tenemos la tecnología necesaria para estabilizarlo ni para mantener su garganta abierta de manera que podamos viajar a través de él. La búsqueda continúa.

de gusano «transitables». Thorne investigó si las leyes de la mecánica cuántica y de la relatividad permitirían a una civilización muy avanzada expandir un agujero de gusano submicroscópico

El que no es matemático siente un estremecimiento cuando oye hablar de cuatro dimensiones, con una sensación parecida a la que despiertan las ciencias ocultas.

ALBERT EINSTEIN

introduciendo en su interior la antes descrita materia exótica en cantidad suficiente para mantenerlo abierto. En el primer artículo sobre el tema, titulado «Agujeros de gusano en el espacio-tiempo y su uso para viajes interestelares», se estudiaban las ecuaciones de la relatividad general para agujeros de gusano mantenidos

por materia exótica. El artículo se publicó en la revista *American Journal of Physics* en 1988 y es uno de los trabajos más citados de Thorne.

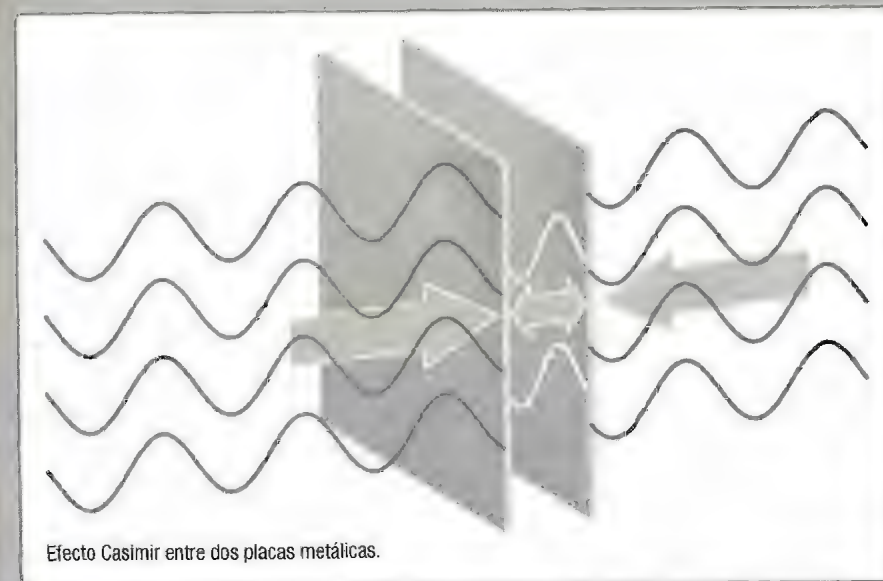
Los estudios de Thorne sobre los agujeros de gusano transitables se iniciaron en 1985. El popular astrofísico Carl Sagan estaba entonces escribiendo su novela *Contacto* y necesitaba que su heroína, Eleanor Arroway (interpretada por Jodie Foster en la película), viajara a Vega, una estrella a 26 años-luz de la Tierra. Sagan consultó a Thorne, quien tuvo la idea de enviar a Eleanor a través de un agujero de gusano estabilizado con materia exótica.

John Wheeler ya había proporcionado argumentos para pensar que los agujeros de gusano existen de forma natural a escala submicroscópica en forma de «espuma cuántica». Esta especie de espuma consiste en una red hipotética de agujeros de gusano que aparecen y desaparecen continuamente, como la espuma que forman las olas del mar al romperse. Sujeta a las leyes de la mecánica cuántica, esa espuma no tiene una estructura definida en el espacio. Solo existen probabilidades para sus distintas formas y curvaturas. En un instante podría haber un 50% de probabilidad de tener una forma, un 10% de poseer otra distinta y un 40% de manifestar una tercera: estarían continuamente cambiando.

Aunque la espuma cuántica estaría en todas partes, sería imposible observarla con un microscopio, ya que es más pequeña

UNA MATERIA EXÓTICA ANTIGRAVEDAD

Para mantener abierto un agujero de gusano, el túnel debe alimentarse con material de energía negativa, lo que produce una fuerza de antigravedad que empuja hacia fuera e impide que el agujero colapse. Esta material se conoce con el nombre de *materia exótica*. Ya en 1948, el físico norteamericano Hendrick Casimir (1909-2000) demostró que la energía negativa existe debido al principio de indeterminación de la física cuántica. La indeterminación acerca de la cantidad de energía que hay en un volumen minúsculo durante un corto lapso de tiempo permite fluctuaciones cuánticas de vacío: una espumita con fotones de todas las longitudes de onda que aparecen durante un breve instante para luego desaparecer. Podríamos generar energía negativa entre dos placas metálicas si se colocan paralelas y muy próximas (véase la figura). Entonces únicamente los fotones con las longitudes de onda adecuadas encajarían en el reducido espacio entre las dos placas, como una cuerda de guitarra fija en sus extremos, cuyo sonido solo puede contener un tono y sus armónicos. Por tanto, el número de fotones entre ambas placas es inferior al número de fotones en el exterior. Es decir, que de media hay menos energía entre las placas que en el vacío. Y como en el vacío es cero, la energía entre ambas placas es negativa. Varios experimentos han medido el denominado *efecto Casimir* y, aunque es muy pequeño, demuestra que la energía negativa existe. Thorne propuso mantener un agujero de gusano abierto alineando sus bocas con pares de grandes placas metálicas. El efecto Casimir proporcionaría la energía negativa necesaria.



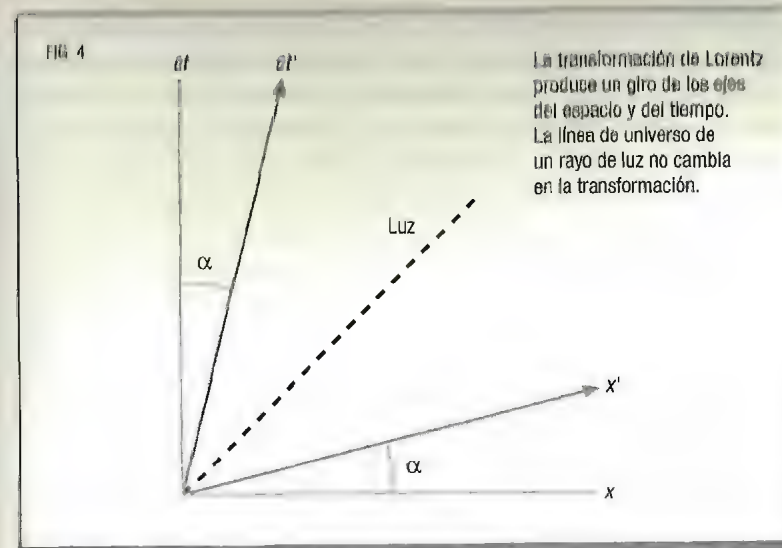
que cualquier cosa que se haya podido medir jamás. La longitud típica de uno de estos agujeros de gusano es igual a la llamada *longitud de Planck* (una longitud por debajo de la cual se estima que el espacio deja de tener geometría clásica), que ostenta el minúsculo valor de 10^{-33} cm. Esta longitud es también el radio de las dimensiones extras enrolladas que componen el hiperespacio en la teoría de supercuerdas.

Aún se desconoce si la espuma cuántica existe. Las leyes de la gravedad cuántica podrían suprimir la espuma o incluso prevenir su aparición. Pero no podemos estar seguros, pues todavía no existe una teoría cuántica satisfactoria de la gravedad. Si dicha espuma existe, quizá una civilización ultra avanzada podría encontrar el medio de agrandar un agujero de gusano y rellenarlo con materia exótica para mantenerlo abierto. Esta idea puede parecer una especulación arriesgada (ciertamente lo es), incluso para esa hipotética civilización tan evolucionada. Pero quizá solo nos lo parece porque no comprendemos las leyes de la gravedad cuántica que controlan esta espuma. Sin embargo, los agujeros de gusano transitables son los candidatos más prometedores para construir máquinas del tiempo. Veamos cómo.

TU PRESENTE ES MI PASADO Y MI FUTURO

Dos sucesos simultáneos respecto a un observador, no lo son para otro que se mueve con velocidad relativa. Una consecuencia de ello es que ciertos sucesos que yo sitúo en el pasado y en el futuro, pueden estar ocurriendo en el presente para otro observador. Este resultado de la relatividad especial es esencial para entender el funcionamiento de las cuerdas de Gott y de otras máquinas del tiempo. Conviene examinarlo detenidamente con ayuda de los diagramas de Minkowski.

Consideremos un observador, O' , que se mueve con velocidad v en el sentido positivo del eje x , con respecto a un observador O en reposo. La relación entre las coordenadas de posición y tiempo medidas por ambos observadores (transformación de



Lorentz) puede representarse gráficamente mediante un diagrama (figura 4). Nótese que el eje ct' está inclinado con respecto al eje ct , ya que corresponde a la línea de universo de O' vista por O . El ángulo de inclinación α aumenta con la velocidad. Si O' se moviera a la velocidad de la luz, el ángulo de inclinación de su eje temporal sería de 45° y coincidiría con la línea de universo del rayo de luz mostrada en la figura.

Observamos que el eje x' también forma un ángulo con el eje x . Esto no significa que el observador O' se mueva en otra dirección, ya que la desviación del eje x' se produce hacia la dimensión temporal. La transformación de Lorentz mezcla el tiempo y el espacio. Lo más importante es que el ángulo que forman los ejes x, x' es exactamente el mismo que entre los ejes ct, ct' . Esto es una consecuencia de la invariancia de la velocidad de la luz. Así, en el gráfico de la figura 4 el rayo de luz es el mismo para ambos observadores.

El tiempo y el espacio para el observador en movimiento no son perpendiculares. Esto no debería resultar extraño. Estamos acostumbrados a usar coordenadas cartesianas: largo, ancho y alto. Pero la dirección del tiempo no corresponde a ninguna

dirección física espacial. Las coordenadas de un punto en un sistema de ejes que no son perpendiculares pueden calcularse construyendo un paralelogramo con las dos rectas paralelas a los ejes que pasan por el punto A. Los cortes de estas dos rectas con los ejes son las coordenadas x'_A y ct'_A (figura 5).

En realidad el diagrama de la figura 4 no basta para encontrar la relación entre las coordenadas de los dos sistemas. Además de rotar los ejes, la transformación de Lorentz requiere dividir cada

FIG 5

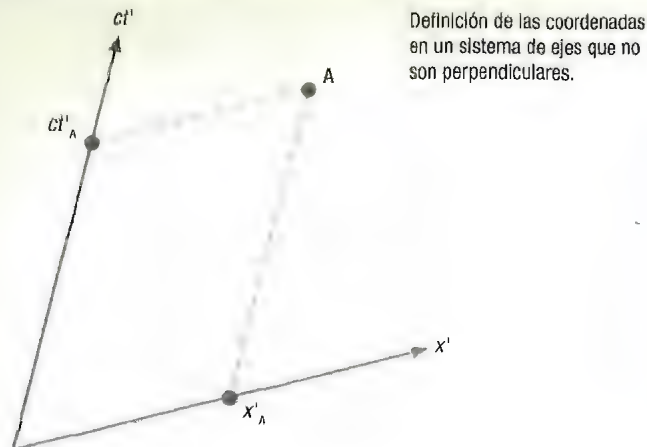


FIG 6

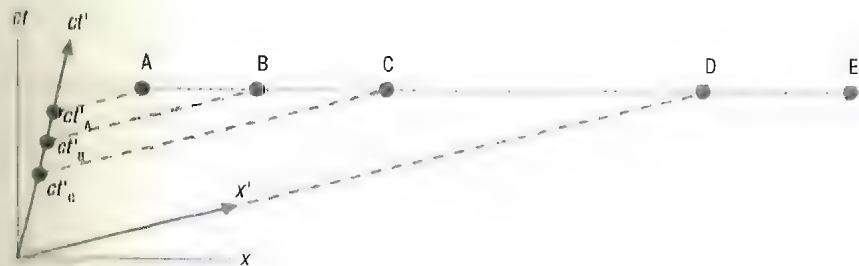


Diagrama en el que se visualiza una serie de sucesos A, ..., E, que son simultáneos en el sistema en reposo, pero que ocurren en tiempos distintos según un observador en movimiento.

coordenada por el factor de contracción de Lorentz $\sqrt{1 - (v/c)^2}$, que se introdujo en la ecuación [2] del capítulo 1. En esta discusión no consideraremos dicho factor, ya que puede añadirse posteriormente y solo estamos interesados en visualizar cómo se ordenan temporalmente los sucesos. La ordenación de sucesos en el tiempo no depende del factor de Lorentz.

Consideremos ahora la serie de sucesos, A, B, C, D, E (figura 6). Cada suceso se representa con un punto en una recta horizontal paralela al eje x . Por tanto, todos estos sucesos son simultáneos para el observador en reposo. Es decir, ocurren todos en el mismo instante t .

Trazando las rectas paralelas al eje x' que pasan por cada uno de estos puntos, podemos predecir los tiempos en los que ocurren estos sucesos para el observador O' . Siguiendo el esquema de la figura 5, cada tiempo se obtiene a partir de la intersección de la recta correspondiente con el eje ct' . Vistos por el observador en movimiento, los sucesos ocurren en tiempos distintos y están ordenados de la siguiente forma: $t'_E < t'_D < t'_C < t'_B < t'_A$.

Los dos observadores se cruzan en el instante inicial $t = t' = 0$, en el que sus relojes están sincronizados. En ese preciso momento, que es el presente para ambos observadores, todos los sucesos A, ..., E, pertenecen al futuro de O. Sin embargo, según O' , el suceso E pertenece al pasado, el suceso D pertenece al presente y los demás sucesos pertenecen al futuro. Están ordenados de manera que el suceso más lejano en la dirección del movimiento ocurre en primer lugar.

VIAJEMOS A TRAVÉS DE LAS PUERTAS DEL TIEMPO

Emprendamos un experimento mental, partiendo de la base de que existen portales dimensionales, ya sean naturales o contruidos por una civilización avanzada, que permiten viajar casi instantáneamente a otro lugar del espacio-tiempo. A estos pórticos les llamaremos «puertas del tiempo». No nos centraremos aquí en la naturaleza de esas puertas ni en cómo están contruidas. Nos interesan porque son una forma simbólica de representar la

entrada a un sendero en el espacio-tiempo, o a través del hiperespacio, que nos permite adelantar a un rayo de luz, que tanto podría ser un agujero de gusano transitable como una cuerda cósmica de Gott. Estas puertas del tiempo se presentan en parejas, situadas al inicio y al final del atajo. Entrando por una puerta y saliendo por la otra, habremos adelantado a un rayo de luz que sigue el camino usual por el espacio ordinario. Por ejemplo, al rodear una cuerda cósmica de Gott adelantamos a un rayo de luz que va en línea recta. Por tanto, podríamos sustituir una cuerda cósmica de Gott por un par de puertas del tiempo. También harían esa función las dos bocas de un agujero de gusano, o cualquier hipotético medio o artefacto capaz de hacernos viajar entre dos puntos a velocidad superior a la luz.

Para simplificar todavía más el experimento, supondremos que disponemos de un tipo de puertas del tiempo que permiten trasladarse de un punto a otro del espacio instantáneamente para un observador que esté en reposo con respecto a ellas. Al entrar por la puerta número 1, situada en el punto A, saldremos inmediatamente por la puerta número 2, situada en el punto B. El recorrido se puede hacer a la inversa. Entrando por la puerta 2 en B, saldremos instantáneamente por la puerta 1 en A.

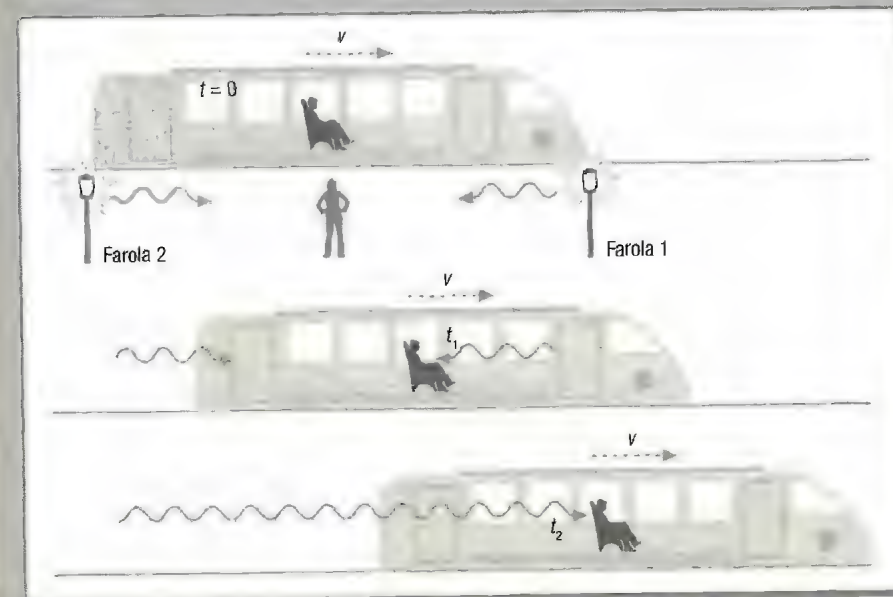
En primer lugar, debe quedar claro que un par de puertas del tiempo como el que hemos descrito no permite viajar al pasado. Solo permite trasladarnos a una velocidad superior a la de la luz, o, en el presente caso, a velocidad infinita. No son puertas que concatenen una época cronológica con otra más pretérita. Si atravesamos la puerta 1 en A, no viajamos al pasado, sino que seguimos en el presente en B. Al cruzar la puerta 2 volvemos a A un instante después de nuestra partida.

El método para viajar al pasado superando la velocidad de la luz fue sugerido, entre otros, por el físico estadounidense Thomas Roman (coautor del libro *Viajes en el tiempo y motores de curvatura*) y se conoce con el nombre de *anillo de Roman* o *anillo de Viser*. Se trata de utilizar dos pares de puertas del tiempo en movimiento relativo a gran velocidad (figura 7).

Imaginemos dos trenes que atraviesan el andén en sentidos opuestos. Cada tren dispone de un par de puertas del tiempo que

LA SIMULTANIDAD TAMBIÉN ES RELATIVA

Existe un popular y elocuente ejemplo de "simultaneidad" que sirve para explicar el andén de la estación con velocidad v . En el andén hay dos farolas, 1 y 2, que se encienden simultáneamente cuando el frente del tren coincide con la farola 1. La distancia entre las farolas es exactamente igual que la longitud del tren. Por tanto, la parte trasera del tren coincide con la farola 2 cuando ambas se encienden. Para Cecilia, que está de pie en el andén en el punto medio entre las dos farolas, los dos sucesos son simultáneos, ya que los rayos de luz de las farolas llegan al punto medio al mismo tiempo (parte superior de la figura). En cambio, para Alberto, que viaja sentado en el centro del tren, las farolas no se encienden simultáneamente. Primero ve la luz de la farola 1, en el instante t_1 . Durante ese tiempo, el tren se ha movido hacia el rayo de luz una distancia vt_1 , por lo que la luz ha tenido que recorrer una distancia inferior a la mitad del tren (centro de la figura). Algo después, en el instante t_2 , Alberto ve el rayo de luz proveniente de la farola 2. A lo largo de ese momento, Alberto se ha movido alejándose de la farola 2 una distancia vt_2 , y la luz ha tenido que recorrer una distancia superior a la mitad del tren (parte inferior de la figura). Por tanto, nuestro ejemplo sirve para ilustrar que los sucesos hacia los que nos acercamos suceden antes que aquellos de los que nos alejamos, siempre que tales acontecimientos sean simultáneos en algún sistema de referencia.

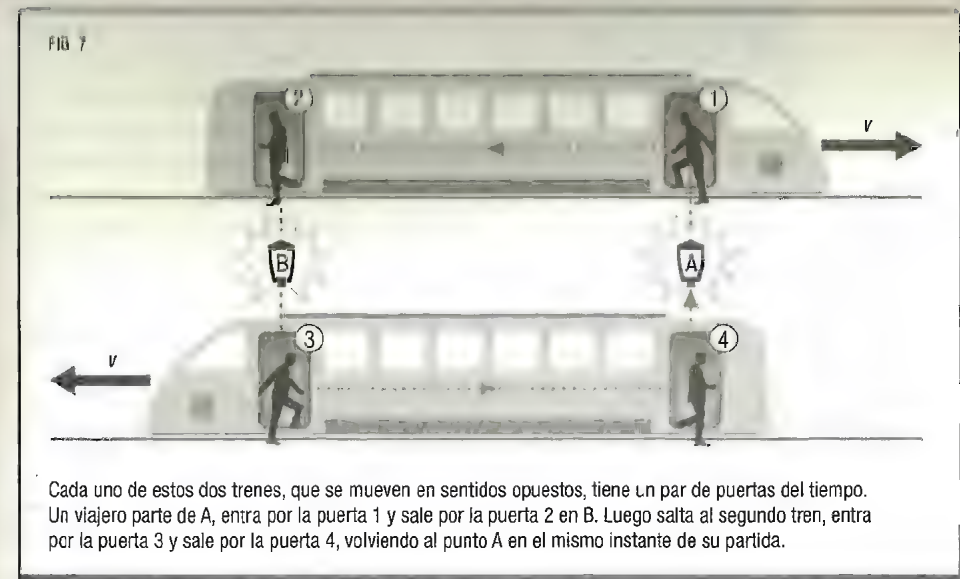


conectan instantáneamente la parte delantera con la trasera del tren. Una captura de imagen tomada a una hora en punto, por ejemplo a las 20 h, muestra el punto de vista de un observador en reposo en la estación (figura 7). A esa hora se encienden simultáneamente las dos farolas situadas en los puntos A y B. Como ya vimos, los dos sucesos simultáneos correspondientes al encendido de las farolas no son simultáneos para los observadores en movimiento. Supongamos que para Alberto, que viaja en el tren superior, moviéndose hacia la derecha a gran velocidad, la farola A se enciende, por ejemplo, diez segundos antes que la farola B. En el instante en que ve la luz de la farola A, Alberto cruza la puerta del tiempo número 1 y sale instantáneamente por la puerta del tiempo número 2 en la parte trasera del tren. Alberto espera diez segundos hasta que ve encenderse la farola B.

En ese preciso momento, el tren de la vía inferior pasa por B, moviéndose hacia la izquierda a la misma velocidad. Asumiremos que Alberto está en una forma física inmejorable y que es capaz de realizar la formidable proeza de saltar al tren inferior y entrar por la puerta del tiempo número 3. Para un observador en el tren inferior, el suceso B ocurre antes que el suceso A. Por tanto, Alberto sale por la puerta 4 diez segundos antes de ver la luz de la farola A, momento en que repite la proeza y salta al tren superior justo a tiempo para verse a sí mismo cruzando la puerta número 1. Alberto acaba de recorrer una curva temporal cerrada, viajando en el espacio-tiempo y volviendo al punto de partida en el instante en que salió. El esquema de este viaje en el tiempo es equivalente al circuito que rodeaba las cuerdas de Gott en la figura 6 del capítulo anterior. Las dos cuerdas de Gott en movimiento corresponderían aquí a los dos trenes con sus respectivos pares de puertas del tiempo.

Tras un tiempo razonable de reflexión, se comprende que la presencia de las farolas no es indispensable para la validez del argumento anterior. Ni siquiera la de un observador en el andén, y tampoco son necesarios los trenes. En realidad, la única condición es que las dos parejas de puertas estén en movimiento relativo.

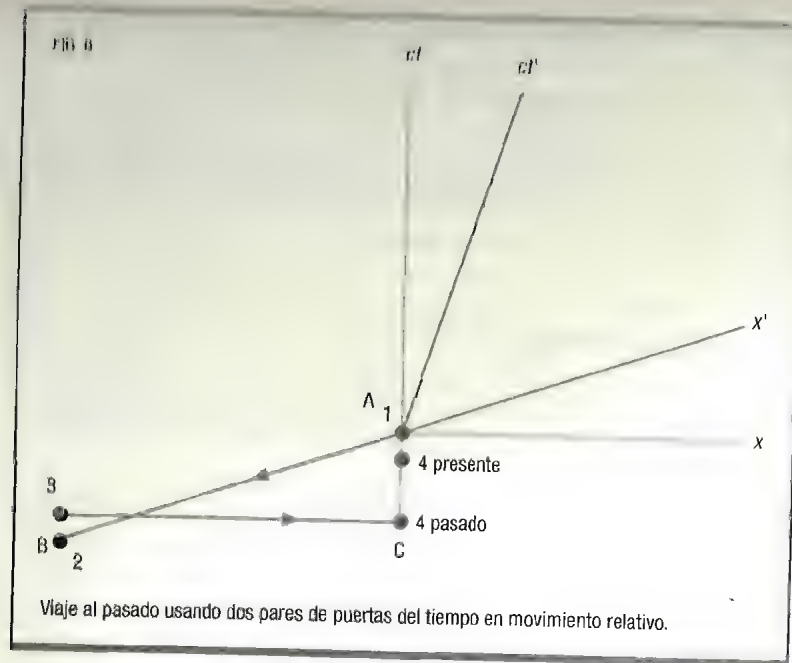
Eliminemos por tanto el segundo tren y adoptemos el punto de vista de un observador que se encuentra en reposo junto a



las puertas 3 y 4, que ahora están situadas en el andén. Alberto se encuentra inicialmente en el andén junto a la puerta 4. Entra en el vagón por la parte delantera y este se pone en movimiento, momento en que Alberto entra por la puerta 1 y sale por la puerta 2 en la parte trasera del tren. Entonces el tren se detiene y Alberto desciende al andén junto a la puerta 3. Ahora ya se encuentra en el pasado. Solo tiene que atravesar la puerta 3 para aparecer por la puerta 4 y llegar al punto pretérito de partida.

Será ilustrativo examinar el diagrama de Minkowski de este viaje en el tiempo (figura 8). Inicialmente, Alberto se encuentra en la estación en A. Las puertas 1 y 2 están sobre el eje x' , correspondiente al sistema del tren en movimiento. Alberto sube al tren y viaja instantáneamente desde la puerta 1 a la puerta 2. Se baja del tren en B. Entra por la puerta 3 y sale por la puerta 4 en C, que se encuentra en el pasado.

Observemos, en primer lugar, que esta máquina del tiempo requiere que las puertas 3 y 4 existan en el pasado. No es posible viajar a un pasado más remoto si no existen esas puertas. Es decir, no es posible viajar a un tiempo anterior al de la construc-



ción de la máquina del tiempo. Este es uno de los principios fundamentales de los viajes en el tiempo y una de las razones que explican que no conozcamos a nadie que nos haya visitado desde el futuro. Es porque *la máquina del tiempo no se ha construido todavía*. Si algún día se construye, desde el futuro remoto no se podrá viajar a un tiempo anterior a ese instante.

En segundo lugar, no se puede viajar hacia atrás en el tiempo un número de años superior a la distancia que hay entre las puertas expresada en años-luz. Esto quiere decir que, en la figura, la altura AC del triángulo ABC es más corta que la base BC. Por tanto, si queremos viajar cien años en el pasado, las puertas 3 y 4 (y también 1 y 2) deben estar separadas más de cien años-luz.

En tercer lugar, para viajar al pasado no es necesario que los trenes viajen a velocidades próximas a la de la luz. Para velocidades pequeñas, el eje x' tendría menos inclinación, pero el punto B siempre se encontraría en el pasado. Bastaría con alejar las puertas lo suficiente para viajar a un pasado remoto. Por

ejemplo, al 10% de la velocidad de la luz, la separación entre las puertas debe ser mil años-luz para viajar cien años al pasado.

El procedimiento anterior podría utilizarse como punto de partida, con una base científica sólida, para un relato de ciencia ficción que recreara cómo podrían ponerse en práctica los viajes en el tiempo. Cualquier parecido con la película *Stargate*, protagonizada por Kurt Russell, es pura coincidencia.

VIAJE EN EL TIEMPO POR EL PLANETA X

Es el año 2120. Cien años atrás se descubrió en la Tierra, enterrada bajo una pirámide de Egipto, una puerta del tiempo (la puerta 4), colocada allí por una especie extraterrestre. La puerta conducía instantáneamente a otra puerta (la puerta 3) en el planeta X, a millones de años-luz de distancia. Estudiando la puerta, los humanos aprendieron la tecnología para viajar a velocidades próximas a la luz y para construir otras dos puertas del tiempo. La puerta 1 se colocó en la Tierra en el interior de un avión y la puerta 2 se colocó en otro avión similar en el planeta X.

Desde entonces, cada día, a las nueve de la mañana, el avión en la Tierra despegó cargado de pasajeros. El avión en el planeta X también despegó a la misma hora, sincronizada con la Tierra. Los ordenadores de a bordo realizan complicados cálculos para alinear las trayectorias e igualar las velocidades de los dos aviones en los dos planetas para que se encuentren en reposo el uno respecto al otro, en el mismo sistema de referencia. En ese instante, los pasajeros del avión en la Tierra atraviesan la puerta del tiempo número 1 para aparecer por la puerta número 2 en el avión del planeta X. Ya se encuentran en el pasado. Los pasajeros vuelven a sus asientos en el segundo avión, que aterriza en el planeta X. Al bajar y atravesar la puerta 3, son trasladados a la puerta 4 en la Tierra cien años atrás. El viaje de vuelta al futuro se realiza mediante la mal llamada «paradoja de los gemelos», a bordo de una nave espacial que despegó de la Tierra, viaja por el espacio a velocidades próximas a la luz y vuelve a nuestro planeta al instante de partida cien años en el futuro.

Los primeros turistas del futuro llegaron a la Tierra en el año 2020, cuando se construyó la máquina del tiempo, procedentes del año 2120. No es posible viajar más atrás de 2020 en el pasado. Los habitantes de 2020 no tuvieron que esperar cien años para viajar en el tiempo. Cuando en 2020 llegaron los primeros visitantes del futuro, un grupo de personas se unió a ellos, en su viaje de regreso, para visitar el año 2120, ya que se había comprobado que la máquina del tiempo funcionaba y era posible retornar al pasado.

LA MÁQUINA DEL TIEMPO DE THORNE

En 1987, el prolífico físico Kip Thorne descubrió una segunda forma muy ingeniosa de construir una máquina del tiempo, usando solamente un agujero de gusano.

Su colega Thomas Roman había sugerido a Thorne que, si los agujeros de gusano transitables están permitidos por las leyes de la física, entonces podrían transformarse en máquinas del tiempo mediante el método de las puertas del tiempo que hemos descrito. El único requisito es que se necesitarían dos agujeros de gusano en movimiento relativo.

Esto llevó a Thorne a estudiar cómo se conecta el tiempo con las dos bocas de un agujero de gusano y descubrió que el flujo del tiempo podría transcurrir a distinta rapidez por el interior del agujero de gusano que por el exterior.

Pongamos por ejemplo que Cecilia y Alberto están en el salón de su casa junto a un agujero de gusano cuyas bocas están separadas cinco metros. Alberto entra por la boca número 1 y atraviesa a gatas el túnel a través del hiperespacio, que solo tiene medio metro de longitud. Para Alberto solo transcurre un segundo y su cabeza aparece inmediatamente por la boca 2. Sin embargo, si el flujo del tiempo transcurre de forma distinta en el interior que en el exterior del agujero de gusano, para Cecilia, que permanece en el salón, sería posible que Alberto desapareciera por la boca 1 y su cabeza apareciera por la boca 2 una hora después. En este caso, existe un desfase de una hora entre el tiempo entre los ex-

tremos del tubo por el interior y por el exterior del agujero. Si Cecilia mira a través de la boca 1 cuando Alberto está entrando, verá que Alberto sale inmediatamente y se encuentra con ella misma una hora después en el futuro. Si, transcurridos esos 60 minutos, Cecilia mira por la boca 2 cuando Alberto está saliendo, verá a la Cecilia del pasado asomada a la boca 1 una hora antes.

Por tanto, este agujero de gusano es una máquina del tiempo y sus dos bocas funcionan como un par de

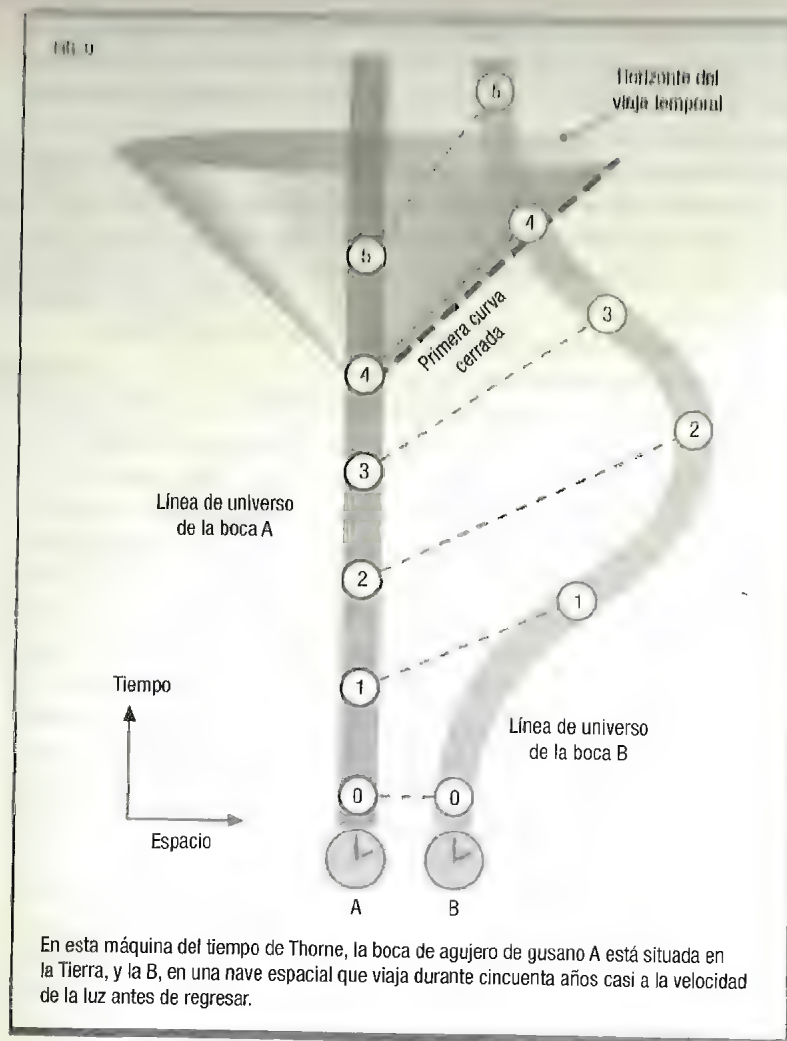
puertas del tiempo. En este caso no se necesitan dos pares de puertas en movimiento. La puerta 1 conduce a la puerta 2 en el futuro. La puerta 2 conduce a la puerta 1 en el pasado. Thorne y sus colaboradores, Mike Morris y Ulvi Yurtsever, descubrieron un método para conseguir un desfase temporal entre las dos bocas de un agujero de gusano. Fue descrito en su artículo «Agujeros de gusano, máquinas del tiempo y la condición de energía débil», publicado en *Physical Review Letters* el 26 de septiembre de 1988, que puede considerarse la fecha oficial en que se hizo público el funcionamiento de la máquina del tiempo basada en un par de puertas del tiempo. También fue la primera vez que una revista de prestigio de física publicaba un artículo conteniendo las palabras *máquina del tiempo* explícitamente en el título.

Ahora visualicemos un diagrama espacio-temporal para la conversión de un agujero de gusano transitable en una máquina del tiempo (figura 9). La boca A del agujero de gusano está colocada en la Tierra. La segunda boca, B, se coloca en una nave espacial que se envía al espacio a velocidad próxima a la de la luz y vuelve a la Tierra después de cincuenta años. Este escenario hace uso de la paradoja de los gemelos. Entrando por la boca B se emerge por la boca A cincuenta años en el pasado. Veamos cómo funciona.

La línea vertical representa la boca A del agujero de gusano que permanece en la Tierra. La línea curva representa la línea de universo de la boca B, que es acelerada a gran velocidad y eventualmente regresa a su planeta de origen. Esta línea es similar a

Los túneles eran agujeros de gusano, distribuidos a intervalos convenientes alrededor de numerosas estrellas de esta y otras galaxias.

CARL SAGAN, EN *CONTACTO*



nuestro diagrama temporal de la paradoja de los gemelos (figura 6 del capítulo 2). Por tanto, los relojes en la parte exterior de las bocas del agujero de gusano experimentan la usual dilatación del tiempo de la relatividad especial. Supondremos que la longitud interior del agujero de gusano se mantiene siempre constante y arbitrariamente corta, por ejemplo medio metro.

Los círculos con los mismos números, conectados por líneas punteadas, indican los puntos del espacio-tiempo con los mismos tiempos propios, medidos por relojes situados inmediatamente fuera de las bocas. Por ejemplo, Alberto va en la nave y, en el punto «1», su reloj marca las 12:00. Mira por el interior de la boca B del agujero y ve a Cecilia, en la Tierra, en el punto correspondiente a su línea de universo marcado «1», con su reloj señalando también las 12:00.

Es importante resaltar que las líneas punteadas que conectan la Tierra con la nave están inicialmente inclinadas más de 45° , hasta llegar al punto marcado «4», a partir del cual son posibles curvas temporales cerradas. En el punto 5, Alberto podría cruzar el túnel del agujero de gusano desde la boca B a la boca A en la Tierra, y luego montarse en una segunda nave espacial a velocidad inferior a la de la luz, siguiendo la línea punteada hacia arriba, y alcanzar su nave en el momento de su partida, en el punto 5.

La línea que une los puntos marcados «4» y que forma parte de la primera curva cerrada delimita la región del espacio-tiempo donde el viaje al pasado es posible. El cono de luz del que esta línea forma parte es el «horizonte del viaje temporal», también llamado «horizonte de Cauchy» o «cronológico». En la región del espacio-tiempo situada sobre el horizonte, un observador puede saltar por el interior de la boca B y emerger por la boca A en el pasado. Pero no es posible volver a los eventos que sucedieron antes de que la máquina del tiempo fuera activada, es decir, a los sucesos por debajo del horizonte. Si la máquina del tiempo se activa el 1 de enero de 2020, no será posible volver a una fecha anterior. Por tanto, no será posible visitar la Antigüedad o la Edad Media a no ser que una civilización avanzada hubiera construido una máquina del tiempo en esa época y nos permitiera utilizarla.

La publicación del artículo de Thorne motivó el inicio de una nueva línea de investigación sobre viajes en el tiempo que muchos físicos teóricos emprendieron con entusiasmo. El físico Igor Novikov descubrió otra forma de construir una máquina del tiempo con un agujero de gusano, haciendo girar una de las bocas en círculo alrededor de la otra. Más tarde, Valeri Frolov y Novikov sugirieron otro método, usando la dilatación gravitatoria del

tiempo para crear el desfase temporal entre las dos bocas. Una de ellas debería colocarse cerca de un intenso campo gravitatorio, como una estrella de neutrones, mientras que la otra boca se mantendría alejada. Prolov y Novikov demostraron que el agujero evolucionaría de forma natural en una máquina del tiempo. La diferencia entre los campos gravitatorios en las dos bocas dilataría gradualmente el tiempo de una boca con respecto a la otra.

PARADOJAS TEMPORALES

Normalmente los físicos teóricos estudian cuestiones como «¿cuáles son las leyes de la física?» y «¿qué predicen estas leyes sobre el universo?». Los estudios sobre viajes en el tiempo se plantean la pregunta «¿qué restricciones ponen las leyes de la física sobre las actividades de una civilización avanzada?». Esto conduce a algunas intrigantes cuestiones sobre las leyes mismas. Por ejemplo, si las leyes de la física permiten la construcción de una máquina del tiempo, esto tendría importantes repercusiones sobre los principios fundamentales de causalidad, libre albedrío, e incluso sobre los fundamentos de la mecánica cuántica.

En su artículo de 1988 sobre la máquina del tiempo, Thorne proponía un «infame» ejemplo: «¿Puede un ser avanzado medir que el gato de Schrödinger está vivo en el evento P (por tanto su función de onda ha colapsado en el estado «vivo») y luego viajar atrás en el tiempo por el agujero de gusano y matar al gato (colapsando su función de onda en el estado «muerto») antes de que alcance P?».

Después de proponer la posibilidad de construir máquinas del tiempo con agujeros de gusano, Thorne y sus colaboradores analizaron las paradojas asociadas con el viaje al pasado. En la paradoja del abuelo, el crononauta viaja al pasado y mata a su abuelo antes de que nazca su padre. Si eso sucede el crononauta nunca nacerá y no podrá volver al pasado a matar a su abuelo. Entonces el abuelo no muere y el crononauta vuelve al pasado a matar al abuelo. Con lo que el crononauta nunca nacerá y no podrá volver al pasado a matar a su abuelo. Y entonces...

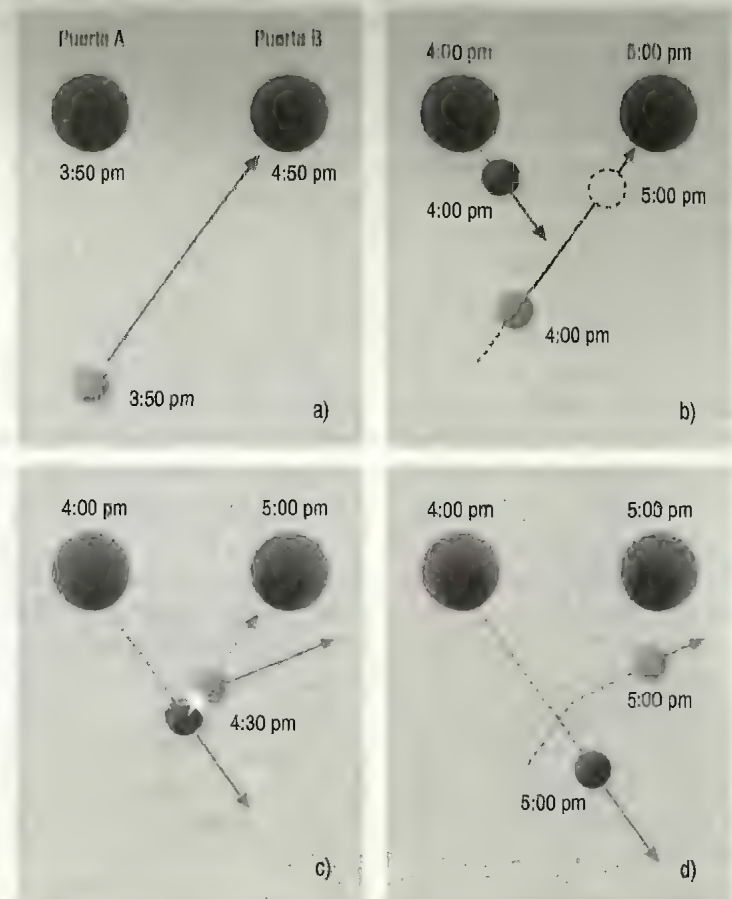
Llegaremos a un círculo vicioso denominado «círculo causal inconsistente», que corresponde a un resultado lógicamente inconsistente, porque, si el asesinato sucede, entonces no sucede. Y si el asesinato no tiene lugar, entonces sí que sucede. Es decir: el asesinato del abuelo sucede solo si no sucede y las leyes de la física no pueden permitir este tipo de paradojas lógicas. Pero en la paradoja del abuelo interviene el elemento humano, y el libre albedrío, que es difícil de predecir con las leyes de la física. ¿Quién sabe lo que puede pasar por la cabeza del viajero en el tiempo en el momento en que se dispone a matar a su abuelo?

Para simplificar el problema y evitar las complicaciones derivadas del libre albedrío —asunto ya de por sí complejo sin necesidad de máquinas del tiempo— imaginaremos experimentos mentales enviando al pasado bolas de billar en lugar de humanos. Mientras que sin duda nosotros somos organismos complejos cuya conducta es difícil de predecir, el comportamiento de las bolas de billar es fácilmente deducible mediante las leyes de la física clásica.

En la versión de la paradoja del abuelo con bolas de billar (figura 10), las dos puertas del tiempo (agujero de gusano) están desfasadas una hora. La puerta o boca B conduce a la puerta o boca A una hora en el pasado. La puerta A conduce a la puerta B una hora en el futuro. A las 3:50 una bola de billar avanza hacia la puerta B (figura 10a). A las 5:00 la bola entra en la puerta B y viaja una hora al pasado, saliendo por la puerta A a las 4:00 (figura 10b). A las 4:30 la bola más vieja choca contra la bola más joven (figura 10c). La colisión desvía a la bola joven de su trayectoria, de modo que a las 5:00 no entra por la puerta B (figura 10d).

Se produce, por tanto, un círculo causal inconsistente similar al de la paradoja del abuelo, pero con bolas de billar. La bola del billar viaja al pasado e impide que ella misma viaje al pasado. El escenario de la figura 10 sigue las leyes de la física, en este caso las leyes de Newton de la mecánica clásica, que describen las trayectorias finales de las partículas a partir de las condiciones iniciales. Los jugadores de billar conocen muy bien estas leyes y pueden calcular mentalmente las trayectorias de las bolas a partir de la velocidad inicial impartida con el taco. Sin embargo,

FIG. 10

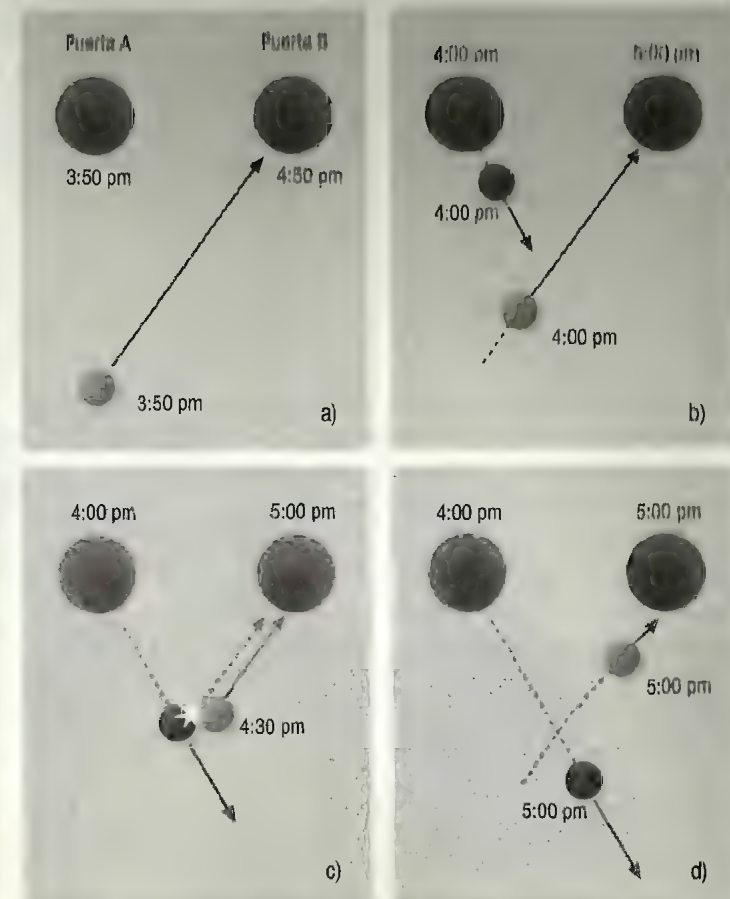


La bola que sale de la puerta A (el pasado) viene del futuro (la puerta B) y choca contra la otra bola, que es ella misma en el futuro, desviando su trayectoria de la puerta B y, paradójicamente, impidiendo que pueda viajar al pasado.

la solución que hemos descrito es autoinconsistente, ya que nos lleva a una paradoja.

Kip Thorne y sus colaboradores descubrieron que, dadas unas condiciones iniciales, era posible encontrar una solución auto-

FIG. 11



En esta figura la bola más vieja solo roza a la más joven, y no evita que entre por la puerta B, de manera que en este caso la bola sí podrá viajar al pasado, y la paradoja es, por tanto, inexistente.

consistente, que resolvía esa situación de contradicción. Planteemos una solución a la paradoja descrita (figura 11). La condición inicial es la misma. La bola más joven se dirige a la puerta B (figura 11a). A las 4:00 la bola proveniente del futuro sale por

la puerta A y se dirige hacia la bola más joven (figura 11b). A las 4:30 las dos bolas chocan, pero la bola del futuro solo roza ligeramente el lado izquierdo de la bola más joven (figura 11c) y esta se desvía, pero no lo suficiente para evitar que entre por la puerta B (figura 11d). Esta solución es autoconsistente, ya que la bola que viene del futuro está ligeramente desviada, colisionará con su yo más joven, pero tan solo rozándolo y desviándolo ligeramente. No hay paradoja.

Esto sugiere una posible solución a la paradoja del abuelo. En las situaciones en las que, para las mismas condiciones iniciales, existen soluciones consistentes e inconsistentes, es posible que la naturaleza siempre elija la solución consistente. Esto llevó al físico ruso Igor Novikov a enunciar la *conjetura de autoconsistencia*, que establece que las leyes de la física solo permiten los viajes en el tiempo autoconsistentes, es decir, no paradójicos. Dada una situación supuestamente paradójica, Novikov conjeturó que, al menos, existe una solución autoconsistente con las mismas condiciones iniciales. Novikov examinó una variedad de casos donde en efecto sucedía así.

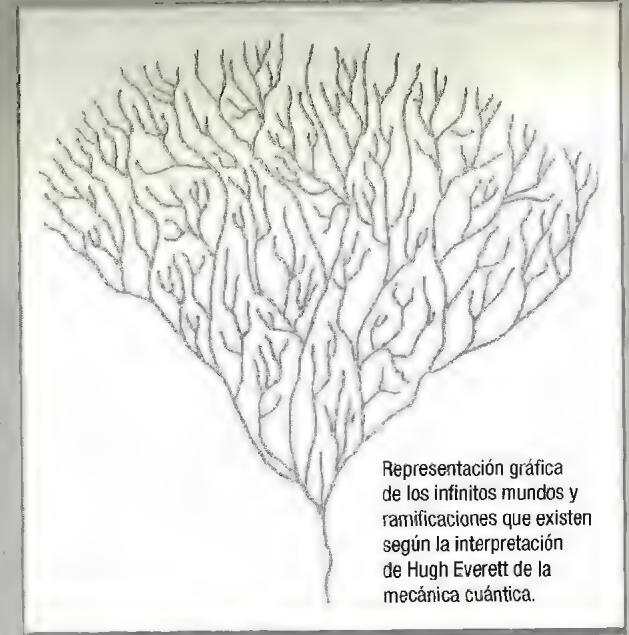
Sin embargo, el físico Allen Everett descubrió una situación donde se llegaba inevitablemente a una paradoja, colocando un sistema de detectores que cerraban automáticamente la puerta B en cuanto la bola del futuro aparecía por la puerta A. Esto llevó a Allen Everett y Thomas Roman a generalizar la conjetura de Novikov, estableciendo el que llamaron *mecanismo de la piel de plátano* o de la no interferencia. Viene a decir que, si alguien viaja al pasado para matar a su abuelo, siempre sucederá algo que lo evite (por ejemplo, resbalará en una piel de plátano). Si los viajes en el tiempo son posibles, las leyes de la física deben incluir cierto mecanismo del tipo «piel de plátano» que garantice que no se produzcan paradojas.

LA DESTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DEL TIEMPO

Desde que Kip Thorne publicó sus trabajos sobre máquinas del tiempo y agujeros de gusano, muchos físicos han investigado

MUNDOS PARALELOS

La interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica fue propuesta por Hugh Everett III (1930-1982) en 1957. Según Everett, existen infinitos mundos paralelos separados entre sí. Cuando un observador realiza una medida de un sistema cuántico el universo se divide en varias ramas, correspondientes a cada uno de los posibles resultados de la medida. En cada uno de los universos paralelos ocurre una cosa distinta. El observador tiene una probabilidad determinada de acabar en una de las ramificaciones, que se puede calcular por las leyes de la mecánica cuántica. Esta interpretación es compatible con la llamada interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. La idea de los mundos paralelos ha sido explotada en numerosas ocasiones en la ciencia ficción, como en la trilogía *Regreso al futuro*.



Representación gráfica de los infinitos mundos y ramificaciones que existen según la interpretación de Hugh Everett de la mecánica cuántica.

Sin paradoja... pero con los átomos disgregados

En 1991 el físico británico David Deutsch formalizó rigurosamente una teoría cuántica de máquinas del tiempo, donde la interpretación de muchos mundos permitiría evitar las paradojas del viaje al pasado, implementando rigurosamente la idea de los universos paralelos en presencia de máquinas del tiempo. Imaginemos que Alberto usa su máquina del tiempo para viajar al pasado y emerge en otro universo donde mató a su abuelo. En ese universo, Alberto continuará su vida como adulto. En ese universo, el futuro Alberto nunca nacerá y jamás se hará mayor para entrar en la máquina del tiempo. No existe paradoja ya que, en el universo donde Alberto nació, nadie mató a su abuelo en el pasado. En 2004 el físico Allen Everett apuntó los peligros del viaje en el tiempo si la teoría de Deutsch fuese correcta, ya que cada partícula elemental de nuestro cuerpo podría viajar a un universo diferente, y nuestros átomos se disgregarían por los múltiples universos.

la posibilidad o imposibilidad de los viajes en el tiempo. Desde los años noventa se han publicado cientos de artículos sobre el tema en las revistas especializadas. Stephen Hawking ha sido el principal abanderado en su contra. De hecho, fue él quien, en 1991, enunció la conjetura de protección de la cronología: «Las

Cuando un científico eminente,
pero anciano, afirma que algo es
posible, seguramente tiene razón.
Cuando dice que algo es imposible,
probablemente se equivoca.

ARTHUR C. CLARKE

leyes de la física prohíben el viaje hacia atrás en el tiempo, manteniendo el universo a salvo para los historiadores».

Stephen Hawking basaba su hipótesis en las leyes de la física cuántica. En el momento en que se construye una máquina del tiempo con un agujero de gusano, son posibles curvas

temporales cerradas que conducen al punto de partida. Entonces cualquier partícula de luz o fotón puede viajar al pasado y volver al presente en el momento de partida, con lo que tendríamos dos fotones en el mismo instante y posición, ocupando el mismo espacio simultáneamente, algo que es imposible con las partículas de materia. Los fotones pueden repetir juntos el viaje al pasado un sinnúmero de veces sucesivas, encontrándonos en el instante inicial con otros cuatro, ocho, dieciséis... Cuando este proceso se haya repetido mil veces, la energía de la partícula inicial se habrá multiplicado por 2^{1000} , que aproximadamente corresponde a un uno seguido de 301 ceros. Esto implica un crecimiento imparable de energía recorriendo el agujero de gusano, lo suficiente para destruirlo de forma explosiva en el mismo momento en que se está creando la máquina del tiempo.

Esto podría evitarse escudando el agujero de gusano contra los fotones. Pero hay algo que no se puede obviar: las fluctuaciones cuánticas del vacío pueden producir fotones de alta energía de la nada, como esa espuma cuántica de fotones que aparecen y desaparecen. Unas fluctuaciones que están predichas por la teoría cuántica de campos, y que son de la misma naturaleza que las del espacio-tiempo, generadoras de agujeros de gusano infinitamente minúsculos. Debido a estas fluctuaciones cuánticas, cuando nos acercamos al horizonte del viaje tem-

poral (como de la figura 9), podría acumularse una densidad de energía infinita, y dicha región del espacio-tiempo se convertiría en una singularidad.

Sin embargo, las leyes actuales de la física no permiten estar seguros de lo que sucedería realmente. Las predicciones actuales se basan en la teoría cuántica de campos sobre espacio-tiempo curvo, o *teoría semiclásica de la gravedad*, que no es una auténtica teoría cuántica de la gravedad. Si pudiéramos encargarnos para ver la espuma cuántica del espacio-tiempo, tanto el espacio como el tiempo dejarían de existir. El espacio-tiempo hierve disgregándose en infinitas gotas disconexas, separadas por regiones vacías donde el espacio y el tiempo no existen. Una verdadera teoría cuántica de la gravedad no puede basarse en el espacio y el tiempo de la relatividad, que son coordenadas continuas que describen nuestra posición (o la de un campo cuántico). El espacio y el tiempo cuánticos ya no pueden utilizarse como coordenadas. Aunque existen varias propuestas para las teorías cuánticas de la gravedad, estas son insatisfactorias o incompletas, y actualmente no permiten describir todos los fenómenos relevantes.

El físico neozelandés Matt Visser, actualmente profesor de la Universidad Victoria de Wellington, Nueva Zelanda, ha sugerido que las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo cerca del horizonte de Cauchy podrían hacerse muy grandes antes de que la densidad de energía llegue a crecer hasta el infinito. Visser definió el «horizonte de confiabilidad» como la región hasta donde las leyes de la gravedad semiclásica son válidas. Más allá, al ir acercándonos al horizonte del viaje temporal, necesitamos las leyes de la gravedad cuántica para saber lo que sucederá.

Si queremos entender si el universo protege la cronología y, por tanto, si las máquinas del tiempo están fuera de la ley, se requiere conocer las leyes de la gravedad cuántica. Pero hoy por hoy, nuestros conocimientos actuales son insuficientes para zanjar la cuestión. Mientras tanto, la conjetura de Hawking sigue en pie, amenazante, ante cualquiera que se aventure a construir una máquina del tiempo. Por el momento, los recuerdos y los sueños seguirán constituyendo nuestra forma de viajar en el tiempo.

- DAVIES, P., *Otros mundos*, Barcelona, Salvat, 1986.
- : *Cómo construir una máquina del tiempo*, 451 Editores, Madrid, 2008.
- EINSTEIN, A., *El significado de la relatividad*, Barcelona, Planeta DeAgostini, 1985.
- EINSTEIN, A. E INFIELD, L., *La evolución de la física*, Barcelona, Salvat, 1986.
- GATES, E., *El telescopio de Einstein*, Barcelona, Alba, 2011.
- GOTT, J.R., *Los viajes en el tiempo*, Barcelona, Tusquets, 2008.
- HAWKING, S., *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*, Barcelona, RBA, 1993.
- HAWKING, S., THORNE, K.S., NOVIKOV, I., FERRIS, T. Y LIGHTMAN, A., *El futuro del espaciotiempo*, Barcelona, Crítica, 2007.
- KAKU, M., *Física de lo imposible*, Barcelona, Penguin Random House, 2008.
- : *Hiperespacio*, Barcelona, Crítica, 2012.
- NOVIKOV, I., *Cómo explotó el universo*, Moscú, Mir, 1990.
- SAGAN, C., *La conexión cósmica*, Barcelona, Orbis, 1986.
- THORNE, K.S., *Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein*, Barcelona, Crítica, 2010.

- aceleración
de la gravedad 17, 42, 50, 61-64, 68, 73, 74, 105
- agujero
de gusano 72, 121-128, 132, 138-143, 148
negro 20, 72, 76-81, 86, 87, 106, 107, 114, 125
- Alfa Centauro 41
- antimateria 56, 57, 89, 91
- antipartícula 56, 89, 91
- autoconsistencia, conjetura de 146
- Big Bang 107, 108
- caída libre 62, 63, 68, 74
- calendario 18, 19
- campo
electromagnético 21
gravitatorio 59, 61-66, 68, 69, 73, 74, 86, 107, 142
- Casimir, efecto 127
- causalidad, violación de la 97, 99, 100
- Chandrasekhar, Subrahmanyam 80
- círculo causal inconsistente 143
- componentes de la métrica 86
- conjetura de protección de la cronología 148
- coordenadas 27-29, 42, 43, 108, 109, 128-130, 149
- cuántica
espuma 126, 128, 148, 149
mecánica 91, 126, 142, 147
- cuarta dimensión 9, 27, 70, 119

cuerdas cósmicas 11, 107-109, 112, 113, 115
 curvas
 temporales 86
 temporales cerradas 11, 78, 83, 89, 96, 99, 100, 101, 108, 114, 115, 141, 148
 curvatura
 de la luz 65, 68, 86
 del espacio-tiempo 9, 69, 74, 75, 77, 88

 ecuaciones de campo 71, 86, 95
 efecto de Lense-Thirring 96, 97
 Einstein, Albert 9, 10, 20, 24, 25, 27, 30, 36, 42, 61-63, 65, 68, 71, 73, 77, 80, 86, 89, 93, 95, 98, 108, 114, 121, 122, 126, 133
 Einstein-Rosen, puente de 121,
 electrón 31, 51, 56, 80, 89-91
 energía
 condición de energía débil 101, 139
 de fusión 54
 negativa 101, 124, 125, 127
 espacio-tiempo
 curvatura del 9, 69, 74, 75, 77, 88
 estrella de neutrones 80, 104-106, 142
 éter, teoría del 22,
 Everett, Allen 114, 146, 147
 Everett, Hugh 147

 Feynman, Richard 89-91
 Flamm, Ludwig 121
 fotón 80, 89-91, 127, 148
 fuerzas de marea 72, 74, 76, 77, 107
 Fuller, Robert 122
 futuro
 cono de luz 83
 viaje al 9, 20, 39, 41, 54, 58

 Galileo, transformación de 24, 28
 geodésicas 69, 71, 72, 74
 Gödel, Kurt 95-99
 Gott, Richard 107-113, 115, 128, 132
 GPS 31, 66, 67
 gravedad
 teoría cuántica de la 128, 147-149
 teoría semiclásica de la 149
 Green, Michael 120

 Helmholtz, Hermann von 20, 25
 hiperespacio 11, 70, 71, 78, 79, 84, 117, 119-125, 128, 132, 138
 hipersuperficie 70
 horizonte
 cronológico 141
 de Cauchy 141, 149
 de confiabilidad 149
 de sucesos 77-79, 87
 de viaje temporal 140, 141, 148, 149
 Huygens, Christiaan 16

ingravidez 62, 63
 integración 47
 intervalo invariante 46, 47, 86 (*véase también* métrica)

Kaluza-Klein, teoría de 120
 Kibble, Tom 108

Lanczos, Cornelius 96
 Langevin, Paul 41
 ley de la no interferencia 8, 146
 libre albedrío 142, 143
 línea
 de universo 43-45, 49, 78, 82, 83, 86, 88-91, 97, 102, 129, 139-141
 de universo espacial 85
 de universo temporal 85
 de vida 43, 44

longitud de Planck 128
 Lorentz,
 contracción de 35, 54, 131
 factor de contracción de 32
 transformación de 28, 29, 42, 129, 130

luz
 ondas de 21, 24
 reloj de 31, 36, 44
 triángulo de 45
 velocidad de la 10, 11, 20, 21, 25, 28-31, 33-35, 39, 43, 44, 47, 48, 50-54, 57, 65, 68, 83, 97, 98, 111, 117, 129, 132, 137, 140

Mallett, Ronald 114
 máquina del tiempo
 de Mallett 114
 débil 98
 fuerte 99

masa
 negativa 101
 solar 80
 materia exótica 101, 107, 125-128
 mecanismo
 de la no interferencia 8, 146
 de la piel de plátano 146
 métrica 46, 48, 86
 Michelson-Morley,
 experimento de 22, 24, 33
 Minkowski, Hermann
 diagrama de 43, 44, 128, 135
 espacio de 42, 43
 momento
 angular 104
 de inercia 104, 105

Nahin, Paul J. 50
 neutrón 11, 56, 80, 91, 96, 104-106, 142
 Newton, Isaac 17, 20, 61, 71, 74
 Novikov, Igor 100, 141, 142, 146
 núcleo 51, 54, 56, 80, 107

Olum, Ken D. 114
 ondas 20, 21, 23, 24, 68, 104
 Oppenheimer, Robert

órbita 18, 19, 62, 66, 71, 77,
 96, 97, 102
 paradoja
 de los gemelos 48, 50, 137,
 139, 140
 de Zenón 15
 del abuelo 8, 97, 143, 146
 temporal 8, 11, 15, 98, 142,
 147
 partículas
 elementales 51, 89, 91, 107,
 108
 radiactivas 51
 pasado
 cono de luz 83, 84, 96
 viaje al 8, 9, 11, 59, 69, 78,
 83, 84, 89, 95, 98, 99, 136,
 141-143, 147, 148
 positrón 56, 89, 90
 principio de equivalencia 63,
 65, 68, 73, 74
 protón 11, 51, 53, 56, 57, 91
 pulsar 104, 106
 quásar 80
 quinta dimensión 70, 76,
 120
 radiactividad 51
 rayos
 cósmicos 57
 gamma 80
 relatividad
 especial 10, 24, 25, 27, 32,
 42, 48-50, 54, 58, 66, 88,
 112, 128, 140
 general 9, 27, 66, 67, 69, 71,
 78, 80, 89, 95, 96, 99, 100,
 114, 126
 principio de 24-27, 36, 61
 relojes
 en movimiento 30, 37
 sincronizados 10, 36, 131
 Roman, Thomas
 anillo de 112, 132
 Rosen, Nathan 121
 Sagan, Carl 126, 139
 Schwarz, John 120
 Schwarzschild, Karl 77, 80
 singularidad 77-80, 87, 101,
 102, 106, 114, 122, 123, 149
 sistema de referencia
 acelerado 26, 61, 63, 68
 inercial 24, 26, 27, 29, 36,
 37, 42, 49, 50, 63, 68, 96
 Stockum, Willem Jacob van
 100
 sucesos simultáneos 36, 128,
 134
 supercuerdas 108, 120, 128
 taquiones 11
 tiempo
 dilatación del 13, 29, 30, 33,
 36, 42, 50, 51, 54, 65, 69,
 73, 76, 140, 141
 máquina del 8-11, 50, 83,
 89, 91, 93, 98, 103, 106-
 110, 113, 114, 117, 135,
 136, 138-142, 146-149
 newtoniano 17
 propio 42, 44-52, 86, 141

Tipler, teorema de 101, 102,
 106, 107
 Thorne, Kip 66, 76, 123, 126,
 127, 138-142, 144, 146
 transporte paralelo 75
 velocidad
 angular 104, 105
 de la luz 10, 11, 20, 21, 25,
 28-31, 33-35, 39, 43, 44,
 47, 48, 50-54, 57, 65, 68,
 83, 97, 98, 111, 117, 120,
 132, 137, 140
 Visser, anillo de 132
 Wheeler, John 20, 80, 121,
 122, 126

La posibilidad de viajar en el tiempo

¿Es posible viajar al futuro? ¿Y al pasado? Por asombroso que parezca la respuesta podría ser afirmativa. Una nave espacial, viajando a una velocidad próxima a la de la luz, se trasladaría al futuro y, superando a la luz por un atajo del espacio-tiempo, retrocedería al pasado. Científicos de la talla de Stephen Hawking, Kurt Gödel y Kip Thorne han investigado la fascinante posibilidad científica y el funcionamiento de hipotéticas máquinas del tiempo. El viaje en el tiempo podría ser posible, si bien su realización práctica requerirá avances tecnológicos extraordinarios.

José Enrique Amaro Soriano es físico nuclear y profesor de la Universidad de Granada.